

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID**

**FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS**

**Departamento de Cristalografía y Mineralogía**



**TESIS DOCTORAL**

Desarrollo de una metodología para el análisis del riesgo volcánico en el marco  
de un sistema de información geográfica

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Francisca Gómez Fernández

Directores

Rosario Lunar Hernández  
Vicente Araña Saavedra

Madrid

**ISBN:** 978-84-669-1599-1

© Francisca Gómez Fernández, 1997



BIBLIOTECA U.C.M.



5307373428

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID  
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS  
DPTO. DE CRISTALOGRAFIA Y MINERALOGIA**



**DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DEL  
RIESGO VOLCANICO EN EL MARCO DE UN SISTEMA DE  
INFORMACION GEOGRAFICA**

**TESIS DOCTORAL**

**Francisca Gómez Fernández**

**Madrid, Noviembre 1996**

R. 7.938



**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTIFICAS  
MUSEO NACIONAL DE CIENCIAS NATURALES  
DPTO. DE VOLCANOLOGIA**





Universidad Complutense de Madrid  
Facultad de Ciencias Geológicas  
Dpto. de Cristalografía



CSIC  
Museo Nacional de Ciencias Naturales  
Dpto. de Volcanología

## **MEMORIA**

### **DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA PARA EL ANALISIS DEL RIESGO VOLCANICO EN EL MARCO DE UN SISTEMA DE INFORMACION GEOGRAFICA**

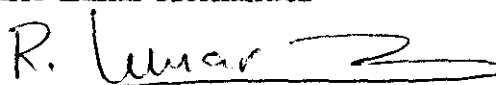
## **PRESENTADA POR**

Francisca Gómez Fernández

**PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR  
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID  
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLOGICAS**

## **DIRECTORES**

Rosario Lunar Hernández

  
Catedrática de Yacimientos Minerales  
Facultad de CC. Geológicas  
Universidad Complutense de Madrid

  
Vicente Araña Saavedra

Director Dpto. Volcanología  
Museo Nal. de CC. Naturales  
CSIC

*A mis padres*



<b>Indice General.</b>	<b>i</b>
<b>Indice de Figuras.</b>	<b>iv</b>
<b>Indice de Tablas.</b>	<b>viii</b>

<b>Presentación.</b>	<b>1</b>
<b>Agradecimientos.</b>	<b>4</b>

## **DISEÑO DE LA METODOLOGIA**

<b>Capítulo I. Introducción.</b>	<b>6</b>
<b>I.1. Justificación del estudio.</b>	<b>6</b>
<b>I.2. Objetivos del estudio.</b>	<b>14</b>
<b>I.3. Planteamiento metodológico.</b>	<b>15</b>
<b>I.4. Hipótesis de trabajo.</b>	<b>20</b>

<b>Capítulo II. Antecedentes.</b>	<b>22</b>
<b>II.1. El concepto de riesgo volcánico.</b>	<b>23</b>
<b>II.2. El análisis del riesgo volcánico.</b>	<b>26</b>
II.2.1. Análisis del área probable de erupción.	29
II.2.2. Análisis de la probabilidad de erupción.	30
II.2.3. Naturaleza de las erupciones futuras.	31
<b>II.3. Los estudios de riesgo volcánico en España.</b>	<b>33</b>
<b>II.4. El potencial de los Sistemas de Información Geográfica.</b>	<b>35</b>

<b>Capítulo III. Los Sistemas de Información Geográfica.</b>	<b>39</b>
<b>III.1. Tipos de Sistemas de Información.</b>	<b>39</b>
III.1.1. Sistemas de Diseño Asistido por Ordenador.	39
III.1.2. Sistemas de Cartografía Automática.	40
III.1.3. Sistemas de Información Territoriales.	40
III.1.4. Sistemas de Información Geográfica.	41
<b>III.2. Funcionalidad de los Sistemas de Información Geográfica.</b>	<b>42</b>
<b>III.3. Componentes de los Sistemas de Información Geográfica.</b>	<b>42</b>
III.3.1. Hardware.	43

III.3.2. Módulos Software de GIS.	43
III.3.3. Los aspectos organizativos de un GIS.	46
<b>III.4. Organización de datos en un GIS: el Sistema Gestor de Bases de Datos.</b>	<b>47</b>
III.4.1. Sistemas jerárquicos.	48
III.4.2. Sistemas en red.	49
III.4.3. Sistemas relacionales.	49
<b>III.5. Almacenamiento de la base de datos gráfica en un GIS.</b>	<b>51</b>
III.5.1. Almacenamiento en modo ráster o en grid.	51
III.5.2. Almacenamiento en modo vector.	52
III.5.3. La elección entre ráster y vector.	53
<b>III.6. Análisis y transformación de datos en un GIS.</b>	<b>54</b>
 <b>Capítulo IV. Diseño de la Metodología.</b>	 <b>59</b>
IV.1. Criterios de diseño de la metodología.	60
IV.2. Elaboración del modelo conceptual de datos.	62
IV.2.1. Identificación de las variables de riesgo.	62
IV.2.2. Procedimiento lógico para el cálculo del riesgo.	67
IV.3. Formulación del modelo cartográfico.	69
IV.3.1. Selección de las entidades de riesgo.	71
IV.3.2. Operaciones necesarias para el cálculo del riesgo.	74
 <b>IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA:</b>	
<b>Aplicación a la Evaluacion Comparativa del Riesgo frente a Coladas Lávicas en la Isla de Tenerife mediante la Generación de Escenarios.</b>	
 <b>Condiciones de implementación.</b>	 <b>76</b>
 <b>Capítulo V. Características del área de estudio.</b>	 <b>81</b>
V.1. Marco geológico.	81
V.1.1. Encuadre geodinámico del volcanismo canario.	81
V.1.2. Historia geológica de la isla de Tenerife.	85
V.2. Marco físico.	92
V.2.1. Climatología.	92

V.2.2. Fisiografía.	96
V.2.3. Hidrología e hidrogeología.	102
V.2.4. Vegetación.	106
<b>V.3. Características socioeconómicas.</b>	<b>109</b>
V.3.1. Población.	111
V.3.2. Agricultura.	112
V.3.3. Infraestructuras.	116
V.3.4. Turismo.	119
 <b>Capítulo VI. Implementación del modelo cartográfico.</b>	 <b>121</b>
<b>VI.1. Implementación de las bases de datos necesarias para la evaluación del riesgo.</b>	<b>121</b>
VI.1.1. Bases de datos volcanológicas.	122
VI.1.2. Bases de datos del medio físico.	137
VI.1.3. Bases de datos socioeconómicas.	138
VI.1.4. Vulnerabilidad.	142
<b>VI.2. Implementación de las operaciones necesarias para la evaluación del riesgo.</b>	<b>143</b>
VI.2.1. Extracción de parámetros de simulación.	143
VI.2.2. Generación de escenarios de riesgo.	144
VI.2.3. Estimación del riesgo potencial.	147
<b>VI.3. Estructura del sistema resultante de la implementación.</b>	<b>149</b>
 <b>Capítulo VII. Evaluación del riesgo frente a coladas lávicas.</b>	 <b>152</b>
<b>VII.1. Caso I: Erupción fisural en la dorsal NW.</b>	<b>153</b>
<b>VII.2. Caso II: Erupción en las estribaciones de la Dorsal de la Esperanza.</b>	<b>167</b>
<b>VII.3. Caso III: Erupción en las laderas Sur de la isla.</b>	<b>177</b>
<b>VII.4. Análisis comparativo del riesgo potencial.</b>	<b>188</b>
 <b>CONCLUSIONES</b>	
 <b>Capítulo VIII. Discusión de los resultados.</b>	 <b>194</b>
<b>VIII.1. En relación con las condiciones de implementación.</b>	<b>194</b>
<b>VIII.2. En relación con los elementos que componen el modelo cartográfico.</b>	<b>200</b>
<b>VIII.3. En relación con las herramientas de trabajo.</b>	<b>204</b>

<b>Capítulo IX. Resumen y Conclusiones.</b>	<b>207</b>
---	------------

<b>Referencias Bibliográficas.</b>	<b>212</b>
------------------------------------	------------

<b>Glosario.</b>	<b>227</b>
------------------	------------

## **ANEXOS**

<b>Anexo A. Características generales de ILWIS.</b>	<b>231</b>
---	------------

<b>A.1. Componentes del software.</b>	<b>231</b>
---------------------------------------	------------

A.1.1. Entrada de datos.	232
--------------------------	-----

A.1.2. Almacenamiento y gestión de datos.	232
---	-----

A.1.3. Salida de datos.	232
-------------------------	-----

A.1.4. Análisis y transformación de datos.	232
--	-----

A.1.5. Interacción con el usuario.	232
------------------------------------	-----

<b>A.2. Representación de datos en ILWIS.</b>	<b>233</b>
---	------------

A.2.1. Mapas de puntos.	233
-------------------------	-----

A.2.2. Mapas de segmentos.	234
----------------------------	-----

A.2.3. Mapas de polígonos.	234
----------------------------	-----

A.2.4. Mapas ráster.	235
----------------------	-----

A.2.5. Datos alfanuméricos.	236
-----------------------------	-----

<b>A.3. Operaciones disponibles en la versión 1.41.</b>	<b>236</b>
---	------------

A.3.1. Operaciones de intercambio de datos digitales (entrada/salida).	236
--	-----

A.3.2. Operaciones con mapas vectoriales.	236
---	-----

A.3.3. Operaciones con mapas ráster.	237
--------------------------------------	-----

A.3.4. Operaciones con tablas.	238
--------------------------------	-----

A.3.5. Operaciones de salida de datos.	238
--	-----

<b>Anexo B. Bases de datos de atributos.</b>	<b>239</b>
--	------------

## Indice de Figuras

<b>Figura 1.1.</b>	Número medio de "eventos catastróficos" registrados por año en el mundo; excepto para las erupciones volcánicas, los datos para la década de los '80 cubren sólo el período 1980-81 (Tilling, 1989).	7
<b>Figura 1.2.</b>	Distribución de las áreas volcánicas activas del planeta, de los seismos con una magnitud superior a 5 en la escala Richter ocurridos en la década de los 80 y localización de los Volcanes de la Década, Volcanes Laboratorio Europeos y pertenecientes a ambos programas. Imagen base: NOAA-AVHRR.	12
<b>Figura 1.3.</b>	Perspectivas en el análisis del riesgo volcánico.	17
<b>Figura 2.1a.</b>	Límites de las áreas de destrucción potencial por colapso de flancos y explosión lateral dirigida: hacia el sur (AA'), hacia el oeste (BB') y hacia el este (CC') en el volcán de la Grande Decouverte, Antillas Francesas (en Cheminee et al., 1995).	27
<b>Figura 2.1b.</b>	Mapa de zonación de peligros para el Nevado del Ruíz, Colombia (en Tilling, 1989).	27
<b>Figura 3.1.</b>	Relaciones entre GIS, CAD, LIS, cartografía automática y otros tipos de sistemas de información.	41
<b>Figura 3.2.</b>	Componentes del hardware de un Sistema de Información Geográfica (a partir de Burrough, 1986).	43
<b>Figura 3.3.</b>	Componentes del software de un Sistema de Información Geográfica (Burrough, 1986).	44
<b>Figura 3.4.</b>	Entrada de datos (Burrough, 1986).	44
<b>Figura 3.5.</b>	Componentes de la base de datos geográfica (Burrough, 1986).	45
<b>Figura 3.6.</b>	Salidas de datos (Burrough, 1986).	45
<b>Figura 3.7.</b>	Transformación de datos (Burrough, 1986).	46
<b>Figura 3.8.</b>	Aspectos organizativos de un Sistema de Información Geográfica (Burrough, 1986).	47
<b>Figura 3.9.</b>	Estructura de base de datos jerárquica.	49
<b>Figura 3.10.</b>	Estructura de Datos en Red para polígonos simples. (a) El mapa M (b) Los dos polígonos que lo componen I y II (c) Una estructura en red ligando todos los polígonos, líneas y puntos.	50
<b>Figura 3.11.</b>	Estructura de base de datos relacional.	50
<b>Figura 3.12.</b>	Formatos de almacenamiento de datos gráficos en un GIS.	52
<b>Figura 3.13.</b>	Representación esquemática de la jerarquía de operaciones de transformación de datos que presentan los Sistemas de Información Geográfica (Burrough, 1986).	55
<b>Figura 4.1.</b>	Modelo conceptual de datos.	63
<b>Figura 4.2.</b>	Flujo de datos (modelo cartográfico) para la evaluación del riesgo en el marco de un GIS.	70



<b>Figura 5.1.</b>	Localización del Archipiélago Canario y la Isla de Tenerife.	82
<b>Figura 5.2.</b>	Evolución de la actividad volcánica en la isla de Tenerife (en Araña & Carracedo, 1978). (a) Teórica configuración de la isla (o conjunto de islas) hace más de 3 m.a.; (b) Esquema de los edificios formados entre -3 y -0,5 m.a. y (c) Centros eruptivos y materiales emitidos hace menos de medio millón de años.	86
<b>Figura 5.3.</b>	Representación esquemática de la estratigrafía de la pared de la caldera de Las Cañadas (Martí et al., 1994a).	89
<b>Figura 5.4.</b>	Gradiente térmico vertical para las isothermas del mes de Agosto (en El País- Aguilar, 1993). Se observa la inversión en el gradiente a partir de los 1.200 m, dependiendo de la orientación de la ladera.	93
<b>Figura 5.5.</b>	Localización de los principales conjuntos morfoestructurales de la isla de Tenerife.	99
<b>Figura 5.6.</b>	Distribución de la red de barrancos de la isla de Tenerife. En color rojo aparecen marcados los cauces principales.	103
<b>Figura 5.7.</b>	Esquemas hidrogeológicos de la isla de Tenerife (a partir del Plan Hidrológico Insular, 1989).	105
<b>Figura 5.8.</b>	Zonación hidrogeológica de la isla de Tenerife (fuente: Plan Hidrológico Insular, 1989).	107
<b>Figura 5.9.</b>	Cliserie altitudinal de la isla de Tenerife (en El País-Aguilar, 1993).	108
<b>Figura 5.10.</b>	Series de vegetación de la isla de Tenerife (Rivas Martín, 1987).	110
<b>Figura 5.11.</b>	Densidad de población en Tenerife para el año 1.986 (en El País-Aguilar, 1993).	113
<b>Figura 5.12.</b>	Tasas de variación de la población en Tenerife para el período 1960-1980 (en El País-Aguilar, 1993).	113
<b>Figura 5.13.</b>	Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de la isla de Tenerife (MAPA, 1989).	115
<b>Figura 5.14.</b>	Vías de comunicación principales de Tenerife, localización de núcleos urbanos, puertos y aeropuertos.	117
<b>Figura 6.1.</b>	Distribución de los centros de emisión visibles pertenecientes a las series III y IV. Imagen base: composición Landsat 5 TM 5-4-3 (RGB).	124
<b>Figura 6.2.</b>	Localización potencial de futuros centros eruptivos en Tenerife. En valores intensos de rojo aparecen representadas las áreas más probables.	129
<b>Figura 6.3.</b>	Distribución de estilos eruptivos identificados en Tenerife.	132
<b>Figura 6.4.</b>	Clasificación en zonas de susceptibilidad a la intervención de agua.	134
<b>Figura 6.5.</b>	Clasificación de estilos eruptivos en función de su susceptibilidad a la intervención de agua.	136
<b>Figura 6.6.</b>	Modelo de elevación digital de Tenerife.	139

<b>Figura 6.7.</b>	Localización de las galerías, canales principales de distribución, presas y balsas (fuente: Plan Hidrológico Insular, Cabildo de Tenerife).	141
<b>Figura 6.8.</b>	Representación esquemática del modelo de máxima pendiente.	146
<b>Figura 6.9.</b>	Estructura del sistema resultante de la implementación del modelo cartográfico en Tenerife.	150
<b>Figura 7.1.</b>	Escenario de riesgo resultante de la aplicación del modelo para simular una erupción fisural en el área de cumbres de la dorsal NW.	154
<b>Figura 7.2.</b>	Representación de las vías de comunicación, núcleos urbanos y elementos estratégicos potencialmente afectados por las lavas.	157
<b>Figura 7.3.</b>	Usos del suelo y canales principales de distribución de agua en las áreas potencialmente afectadas por las lavas.	162
<b>Figura 7.4.</b>	Mapa de riesgo máximo potencial para la simulación de una erupción fisural en el área de cumbres de la dorsal NW de Tenerife.	166
<b>Figura 7.5.</b>	Escenario de riesgo resultante de la aplicación del modelo para simular una erupción en las estribaciones de la dorsal de La Esperanza.	168
<b>Figura 7.6.</b>	Representación de las vías de comunicación, núcleos urbanos y elementos estratégicos potencialmente afectados por las lavas.	171
<b>Figura 7.7.</b>	Mapa de riesgo máximo potencial para la simulación de una erupción en las estribaciones de la dorsal de La Esperanza.	176
<b>Figura 7.8.</b>	Escenario de riesgo resultante de la aplicación del modelo para simular una erupción en las laderas Sur de la isla.	178
<b>Figura 7.9.</b>	Representación de las vías de comunicación, núcleos urbanos y elementos estratégicos potencialmente afectados por las lavas.	181
<b>Figura 7.10.</b>	Mapa de riesgo máximo potencial para la simulación de una erupción en las laderas Sur de Tenerife.	187

## Índice de Tablas.

<b>Tabla 1.1.</b>	Pérdida de vidas según el tipo de desastre y el continente en el período 1947-80 (Alexander, 1993).	7
<b>Tabla 1.2.</b>	Pérdida de vidas humanas (y porcentajes) como consecuencia de la actividad volcánica en el período 1600-1986, agrupadas de acuerdo con la causa de la muerte (Tilling, ed. 1989).	8
<b>Tabla 1.3.</b>	Volcanes de la Década.	11
<b>Tabla 3.1.</b>	Comparación entre los métodos vectoriales y ráster (Burrough, 1986).	53
<b>Tabla 5.1.</b>	Erupciones históricas en Tenerife.	92
<b>Tabla 5.2.</b>	Indicadores térmicos y de humedad de Tenerife (fuente: INIA, 1977).	96
<b>Tabla 5.3.</b>	Distribución porcentual de la superficie de la isla por altitudes.	97
<b>Tabla 5.4.</b>	Zonación hidrogeológica de la isla de Tenerife (PHI, 1989).	106
<b>Tabla 5.5.</b>	Principales usos y aprovechamientos de Tenerife (M.A.P.A., 1989).	114
<b>Tabla 6.1.</b>	Resultados del análisis del número de vecinos reflexivos.	126
<b>Tabla 6.2.</b>	Resultados del análisis de la distancia media al vecino más próximo.	127
<b>Tabla 7.1.</b>	Caso I: Términos municipales potencialmente afectados por las lavas.	156
<b>Tabla 7.2.</b>	Caso I: Núcleos urbanos potencialmente afectados por las lavas.	158
<b>Tabla 7.3.</b>	Caso I: Vías de comunicación potencialmente afectadas por las lavas.	160
<b>Tabla 7.4.</b>	Caso I: Usos del suelo potencialmente afectados por las lavas.	161
<b>Tabla 7.5.</b>	Caso I: Población total potencialmente afectada por núcleo urbano en el área cubierta por las lavas.	165
<b>Tabla 7.6.</b>	Caso I: Pérdida máxima potencial de las redes viarias situadas en el área cubierta por las lavas.	165
<b>Tabla 7.7.</b>	Caso I: Pérdida máxima potencial de los usos del suelo situados en el área cubierta por las lavas.	165
<b>Tabla 7.8.</b>	Caso II: Términos municipales potencialmente afectados por las lavas.	169
<b>Tabla 7.9.</b>	Caso II: Núcleos urbanos potencialmente afectados por las lavas.	170
<b>Tabla 7.10.</b>	Caso II: Vías de comunicación potencialmente afectadas por las lavas.	172
<b>Tabla 7.11.</b>	Caso II: Usos del suelo potencialmente afectados por las lavas.	173
<b>Tabla 7.12.</b>	Caso II: Población total potencialmente afectada por núcleo urbano en el área cubierta por las lavas.	175
<b>Tabla 7.13.</b>	Caso II: Pérdida máxima potencial de las redes viarias situadas en el área cubierta por las lavas.	175

<b>Tabla 7.14.</b>	Caso II: Pérdida máxima potencial de los usos del suelo situados en el área cubierta por las lavas.	175
<b>Tabla 7.15.</b>	Caso III: Términos municipales potencialmente afectados por las lavas.	179
<b>Tabla 7.16.</b>	Caso III: Núcleos urbanos potencialmente afectados por las lavas.	180
<b>Tabla 7.17.</b>	Caso III: Vías de comunicación potencialmente afectadas por las lavas.	183
<b>Tabla 7.18.</b>	Caso III: Usos del suelo potencialmente afectados por las lavas.	184
<b>Tabla 7.19.</b>	Caso III: Población total potencialmente afectada por núcleo urbano en el área cubierta por las lavas.	185
<b>Tabla 7.20.</b>	Caso III: Pérdida máxima potencial de las redes viarias situadas en el área cubierta por las lavas.	185
<b>Tabla 7.21.</b>	Caso III: Pérdida máxima potencial de los usos del suelo situados en el área cubierta por las lavas.	185
<b>Tabla B1.</b>	Características de los eventos eruptivos de las series III y IV.	239
<b>Tabla B2.</b>	Resultados del análisis del número de vecinos reflexivos para una distribución de puntos regular.	241
<b>Tabla B3.</b>	Resultados del análisis de la distancia media al vecino más próximo para una distribución de puntos regular.	241
<b>Tabla B4.</b>	Resultados del análisis del número de vecinos reflexivos para una distribución de puntos aleatoria.	241
<b>Tabla B5.</b>	Resultados del análisis de la distancia media al vecino más próximo para una distribución de puntos aleatoria.	242
<b>Tabla B6.</b>	Estadísticas de población de los núcleos urbanos de Tenerife.	242
<b>Tabla B7.</b>	Redes de comunicación viaria de Tenerife.	252
<b>Tabla B8.</b>	Elementos estratégicos de Tenerife.	253
<b>Tabla B9.</b>	Fichero tipo de documentación del escenario de riesgo resultante de la aplicación del modelo de lavas.	255



## **PRESENTACION**

La investigación volcanológica ha experimentado un notorio avance en las últimas décadas. La entrada en erupción de volcanes que se consideraban poco peligrosos o extintos como el St. Helens (1980) o, más recientemente, el Chichón (1982) o el Pinatubo (1991), puso de manifiesto la enorme magnitud que pueden alcanzar algunos de los fenómenos que se pueden desencadenar como consecuencia de una erupción volcánica e hicieron revisar numerosos conceptos y teorías que con anterioridad no habían podido ser comprobados. Principalmente en lo que se refiere al volcanismo explosivo, las erupciones que han tenido lugar en las dos últimas décadas han constituido una fuente de datos fundamental para el análisis detallado de ciertos fenómenos volcánicos sobre los que con anterioridad simplemente se especulaba.

El desarrollo de los medios de comunicación de masas y la información a la que hoy en día tiene acceso el público general, han permitido que el fenómeno volcánico no se reduzca a algo anecdótico conocido estrictamente por la comunidad científica y la población residente en las áreas afectadas por los fenómenos eruptivos. Imágenes como las de la catástrofe del Nevado del Ruíz (1985) dieron la vuelta al mundo y alertaron a las Autoridades de muchos países sobre las consecuencias catastróficas que una falta de conocimiento, prevención o coordinación podrían tener para su población.

Aunque los medios científicos y tecnológicos todavía están lejos de poder controlar el desarrollo y evolución de la mayoría de los fenómenos volcánicos, son ya lo bastante sofisticados como para estudiarlos en detalle y servir de apoyo en la elaboración de planes de prevención y emergencia que disminuyan lo máximo posible la pérdida de vidas humanas y bienes materiales.

Como respuesta a esta necesidad de conexión entre la realidad científica y la social, surge recientemente y se desarrolla la disciplina del Análisis y Gestión del Riesgo, que engloba tanto a los enfoques científicos y técnicos como a los sociales y económicos mediante la utilización de técnicas y métodos derivados de una amplia variedad de disciplinas (geología, geografía, sociología, etc.).

Para hacer frente a la gran cantidad de datos a los que se debe recurrir para llevar a cabo los estudios de riesgo de forma objetiva y precisa, se ha hecho necesario el desarrollo de herramientas sofisticadas que permitan su tratamiento y análisis. Los Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographical Information Systems*), de gran aplicación en otros campos de las Ciencias de la Tierra, constituyen una herramienta con un elevado potencial y de escasa difusión en este área.

El desarrollo de una metodología de trabajo GIS para la evaluación del riesgo volcánico ha constituido el tema principal de este trabajo. Tomando como precedente las metodologías tradicionales, - para las que la generación de mapas de riesgo ha constituido su objetivo prioritario -, nos hemos planteado el análisis del riesgo desde un punto de vista dinámico e interactivo, donde el mapa deje por sí mismo de ser el fin y se transforme en un medio de experimentación y análisis para el mejor conocimiento de los fenómenos volcánicos.

Para llevar a cabo el desarrollo estructurado de la metodología hemos aplicado un procedimiento que consta de tres pasos: (1) la identificación de los problemas que surgen al aplicar los métodos de trabajo clásicos para la evaluación del riesgo; (2) el diseño de una metodología adecuada para la solución de estos problemas y (3) la implementación de la misma mediante su aplicación al estudio de un área de trabajo concreta que permita verificar la validez de su diseño. De acuerdo con este esquema, el estudio se ha estructurado en tres partes.

La primera agrupa a los dos primeros pasos y en ella hemos establecido los planteamientos sobre los que se ha desarrollado la metodología, revisado los trabajos existentes relacionados con la temática de este estudio y analizado aquellas características de los GIS que resultan fundamentales para llevar a cabo su diseño, el cual hemos abordado en último lugar.

La segunda parte se ha dedicado a implementar la metodología a un área concreta de trabajo (Tenerife, Islas Canarias). La definición de los criterios y objetivos que han de marcar la realización del estudio piloto, el conocimiento de las principales características del área test seleccionada y la inclusión de los datos necesarios para la evaluación del riesgo en el marco de un Sistema de Información Geográfica han constituido la base para la realización de una serie de "ensayos" que han servido para verificar la corrección de su diseño.

El análisis de los resultados obtenidos como consecuencia de la aplicación de la metodología nos ha permitido extraer una serie de conclusiones relacionadas con la operatividad y funcionalidad de la misma y con la utilidad de las herramientas y técnicas aplicadas para el cálculo, las cuales han quedado reflejadas en la tercera parte del estudio.

Como resultado, hemos definido un "*modelo de datos*" útil como base para el futuro desarrollo de herramientas específicas de análisis y gestión del riesgo volcánico, con aplicación en campos que van desde el estrictamente científico al socioeconómico, proporcionando un apoyo fundamental en el análisis del fenómeno volcánico, la elaboración de planes de Emergencia o la Ordenación del Territorio.





## AGRADECIMIENTOS

La presente Tesis Doctoral ha sido realizada en el marco del Proyecto Teide: European Laboratory Volcano (EV5V-CT93-0283, 1993-1995), financiado por el Programa de Medio Ambiente (*Environment Programme*) del IV Programa Marco de Investigación de la Dirección General XII (DG XII - Ciencia, Investigación y Desarrollo) de la Comunidad Europea.

Este proyecto constituye, junto con los de otros cinco Volcanes Laboratorio Europeos, el Programa Volcanológico Europeo (EVOP), propuesto e impulsado por el Comité Coordinador de la Red Volcanológica Europea de la Fundación Europea de las Ciencias (ESF).

Son muchas, quizás demasiadas, las personas e instituciones que han hecho posible la realización de esta Tesis, por lo que espero sinceramente que en este momento de recapitulación no quede nadie "en el tintero". Todas ellas, de una u otra forma, han adoptado un papel fundamental en diversos momentos y han contribuido para que este proyecto saliera adelante.

A Vicente Araña y Rosario Lunar, mis directores, les agradezco el apoyo incondicional, las facilidades proporcionadas para la realización de mis trabajos, los sabios consejos y la confianza que han depositado en mí, demostrada en la libertad de maniobra y criterios que he podido aplicar a lo largo de todo el desarrollo de esta Tesis.

A mis padres, mi familia y mis amigos más cercanos, la estoicidad con la que han soportado mi aislamiento incondicional y la comprensión de que ésta era la única solución posible para superar el inevitable "calvario" de la Tesis.

A mis compañeros y amigos del Museo de Ciencias Naturales por tratarme como si fuera uno más de "la familia" y hacer que me sintiera completamente integrada en el proyecto. A Alfredo, Ramón, Alicia, Mar y Luis por escuchar mis ideas y enriquecerlas en más de una ocasión con sus consejos y aportaciones. A Pepe por sus estupendos dibujos. Y a mis "compañeras de batalla", Alicia, Maica, Isabel y Mayte por los buenos y malos ratos compartidos y la evasión de la "psicótesis" que éstos me han proporcionado.

Especialmente, mi agradecimiento a Alicia Felpeto, por su contribución en la fase de aplicación de la metodología con la aportación de los modelos físicos que forman parte de su propia tesis y la complicidad y apoyo que siempre me ha demostrado.

A mis compañeros en Geosys, Salomón y Carmelo y a don José, por todas las facilidades que han puesto a mi disposición para que la Tesis pudiera llegar a buen término. Por los medios técnicos, por el apoyo en el desarrollo de mis trabajos y por la disponibilidad que he tenido de mi tiempo para organizar mis continuas idas y venidas al Museo y mis viajes.

A todos los compañeros del proyecto Teide que han facilitado sus datos y conocimientos. A Maria José Blanco, directora del IGN en Canarias y amiga, por su ayuda cuando necesitaba orientarme en la "marabunta" administrativa de Canarias. A Carmen Romero, Constantino Criado y Manuel Luis González, de la Facultad de Geografía de La Laguna, por los mapas y publicaciones que pusieron a mi alcance, a Joan Martí y su equipo del Instituto Jaume Almera, por las imágenes de satélite y, junto a Giray Ablay, de la Universidad de Bristol, por ponerme al día en la geología de la zona y por más de una jugosa conversación.

A Chris Newhall, secretario de la IAVCEI, por su entusiasmo e interés en mi trabajo y por su accesibilidad para responder a mis consultas. Y a Eumenio Ancochea, Decano de la Facultad de CC. Geológicas de la UCM, por el tiempo dedicado a pesar de su apretada agenda y sus agudas observaciones, pero sobre todo por su trato sincero y abierto.

A todas aquellas personas e instituciones que han contribuido con datos o información a la realización del proyecto. Al Instituto Geográfico Nacional en sus sedes de Madrid y Sta. Cruz de Tenerife, a D. Luis Mallén y Vicente García de la Unidad de Protección Civil del Gobierno Civil de Tenerife, a D. Fernando Clavijo de la D.G. de Protección Civil del Gobierno Autónomo de Canarias, a D. José F. Bethancourt e Isabel Farrujia del Plan Hidrológico Insular del Cabildo de Tenerife, a D. Enrique Amigó y Antonio Hernández del Servicio de Planes Insulares del Area de Presidencia del Cabildo de Tenerife, a la empresa Galileo y a la División de Ciencias de la Tierra de la UNESCO en París.

A todos ellos les agradezco su ayuda y espero que los resultados de esta Tesis les resulten satisfactorios y dignos de nuestro común esfuerzo.

## **DISEÑO DE LA METODOLOGIA**

## **I. Introducción**

---

## I. INTRODUCCION

El incremento en el número de pérdidas humanas y materiales producidas como consecuencia de la actividad volcánica a lo largo del último siglo, ha motivado el nacimiento de una serie de iniciativas dedicadas al mejor conocimiento de los fenómenos volcánicos para la futura elaboración de planes de prevención y emergencia.

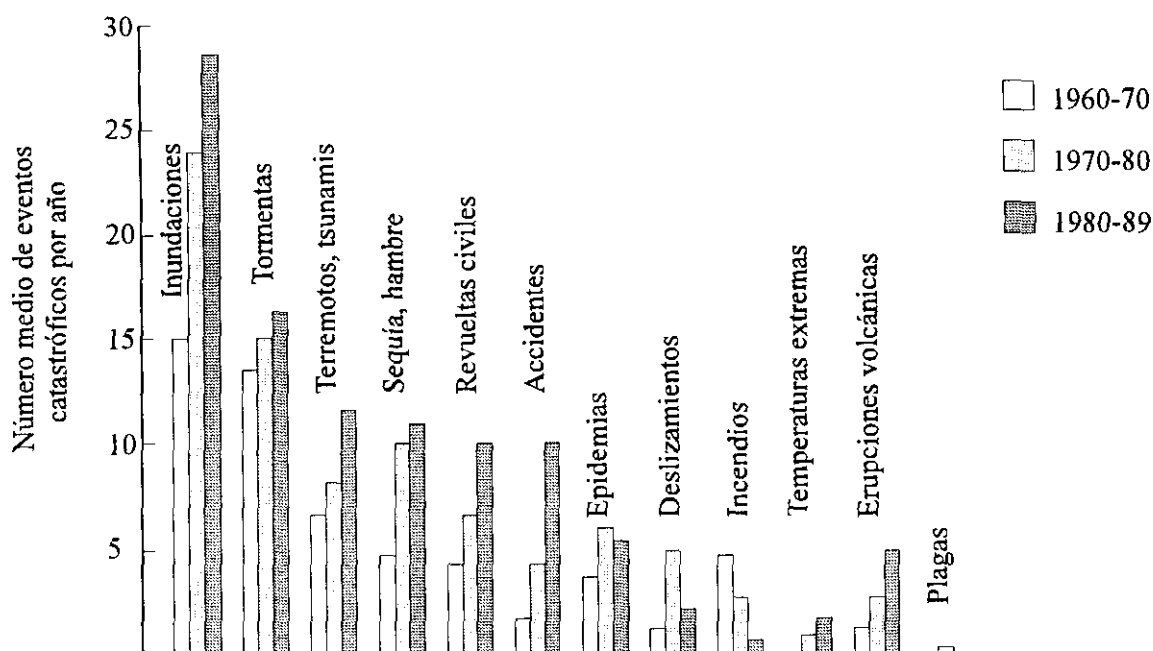
La necesidad de aplicar nuevas técnicas y métodos más efectivos al análisis del riesgo volcánico en áreas activas y la problemática que se deriva de esta situación, nos han proporcionado la justificación para abordar este trabajo de investigación.

Nuestro objetivo principal lo ha constituido el desarrollo de una metodología de trabajo que permita evaluar el Riesgo Volcánico de forma dinámica e interactiva mediante la utilización de las herramientas incorporadas en los Sistemas de Información Geográfica (*Geographical Information Systems, GIS*).

Para ello nos hemos planteado la utilización de un enfoque mixto que tenga en cuenta tanto los objetivos que persiguen las distintas perspectivas utilizadas para la evaluación del riesgo como el carácter multidisciplinar de los métodos de análisis y que utilice como base de cálculo un "estándar" ampliamente reconocido. Los problemas y limitaciones con los que se enfrentan los métodos tradicionales para el análisis del riesgo han servido para establecer la hipótesis sobre la que, posteriormente, hemos llevado a cabo el diseño de la metodología.

### I.1. Justificación del estudio.

En comparación con otros "desastres" naturales o inducidos por el hombre, desde un punto de vista global, los causados por fenómenos volcánicos y asociados son bastante infrecuentes, afectan a un número menor de personas y causan por lo tanto menores pérdidas en vidas humanas y económicas (figura 1.1, tabla 1.1). La erupción más destructiva de la historia (Tambora, Indonesia, 1815) acabó con la vida de 92.000 personas, frente a las 500.000 víctimas que produjo el peor huracán (Delta del Ganges, Bangladesh, 1970) (Tilling ed., 1989).



**Figura 1.1.** Número medio de "eventos catastróficos" registrados por año en el mundo; excepto para las erupciones volcánicas, los datos para la década de los '80 cubren el período (1980-81) (Tilling, 1989). Los "eventos catastróficos" representan la "manifestación de la interacción entre los fenómenos físicos o naturales extremos y un grupo humano vulnerable" que resulta en "interrupción o destrucción general, pérdida de vidas y bienes y heridos".

**Tabla 1.1.** Pérdida de vidas según el tipo de desastre y el continente en el período 1947-80 (Alexander, 1993).

Agente	N° de eventos	Asia	Oceanía	Africa	Europa	Sudamérica	Centroamérica	Norteamérica
Terremotos	180	354521	18	18232	7750	38837	30613	77
Tsunamis	7	4459	-	-	-	-	-	60
Erup. volcánicas	18	2805	4000	-	2000	440	151	34
Inundaciones	333	170664	77	3891	11199	4396	2575	1633
Huracanes	210	478574	290	864	250	-	16541	1997
Tornados	119	4308	-	548	39	-	26	2727
Temporales	73	22008	-	5	146	205	310	303
Niebla	3	-	-	-	3550	-	-	-
Olas de calor	25	4705	100	-	340	135	-	2190
Avalanchas	12	335	-	-	340	4350	-	-
Olas de frío	46	7690	17	-	2780	-	200	2510
Deslizamientos	33	4021	-	-	300	912	260	-
<b>TOTAL</b>		<b>1054090</b>	<b>4502</b>	<b>23540</b>	<b>28694</b>	<b>49275</b>	<b>50676</b>	<b>11531</b>

Sin embargo, desde el año 1.000 d.C. más de 300.000 personas han fallecido a causa de la actividad volcánica de forma directa o indirecta. Blong (1984) analizó las pérdidas en vidas humanas como consecuencia de la actividad volcánica en el período 1600-1982 en función de su causa. Tilling ed. (1989), actualizó estos datos hasta 1986 e hizo un estudio comparativo de pérdidas entre 1600-1989 y 1900-1986 (tabla 1.2).

**Tabla 1.2.** Pérdida de vidas humanas (y porcentajes) como consecuencia de la actividad volcánica en el período 1600-1986, agrupadas de acuerdo con la causa de la muerte (Tilling ed., 1989).

Causa primaria	1600-1899		1900-1986	
Coladas piroclásticas y avalanchas	18.200	9,8	36.800	48,4
Lahares y otros flujos	8.300	4,5	28.400	37,4
Caída de piroclastos y proyectiles balísticos	8.000	4,3	3.000	4,0
Tsunamis	43.600	23,4	400	0,5
Enfermedades y hambre post-eruptivas	92.100	49,4	3.200	4,2
Coladas lávicas	900	0,5	100	0,1
Gases y lluvias ácidas	-----	-----	*1.900	2,5
Otras causas o desconocidas	15.100	8,1	2.200	2,5
<b>TOTALES</b>	<b>186.200</b>	<b>100,0</b>	<b>76.000</b>	<b>100,0</b>
<b>Media anual</b>	<b>620</b>		<b>880</b>	

\* Incluye las muertes causadas por la emisión de gas letal en Camerún (Lago Monoun, 1984 y Lago Nyos, 1986).

Las principales conclusiones que se extraen del análisis de estos datos son las siguientes:

- El número medio anual de víctimas para el periodo 1900-1986 (880) es mayor que el total de los tres siglos anteriores (620).
- En el siglo XX, la incidencia de las muertes causadas por peligros indirectos (ej. hambre, enfermedades, etc.) se ha reducido considerablemente.



- c) Las muertes causadas por algunos peligros directos relacionados con procesos de flujo (ej. coladas piroclásticas) han aumentado de forma importante en el siglo XX, en parte debido al impacto desastroso de dos catástrofes individuales: Mont Pelée, en 1902 y Nevado del Ruíz, en 1985.

Aunque, comparativamente, la pérdida global de vidas humanas causadas por efecto de la actividad volcánica no es dramática, la situación se agrava considerablemente cuando se consideran sus consecuencias desde el punto de vista socioeconómico.

Por lo general, las áreas volcánicas se caracterizan por la riqueza de sus suelos, lo que ha favorecido, en aquellas zonas de clima benigno, el desarrollo de las explotaciones agrícolas de tipo intensivo y la concentración de numerosos núcleos de población en su entorno.

A este hecho se añade el interés paisajístico que suele estar asociado a las áreas volcánicas activas y la curiosidad que despiertan en el público general los fenómenos volcánicos y asociados (p.e. geysers, fumarolas, calderas ...), lo que las convierte en focos de atención para ciertos sectores turísticos que se acrecienta cuando, como ocurre en muchos casos, sus características peculiares han dado lugar a la proclamación de estas áreas como Parques Nacionales o incluso Reservas de la Biosfera, dados los endemismos que suelen presentarse en relación con las mismas. Este hecho ha dado lugar en muchos casos a la aparición de una infraestructura turística y de comunicaciones compleja.

Todos estos elementos han incrementado en conjunto la vulnerabilidad del medio y la población frente a los fenómenos volcánicos a lo largo de este siglo. En consecuencia, al haber aumentado los bienes expuestos, se ha elevado considerablemente el potencial de daños que se pueden producir desde el punto de vista social y económico (pues la economía depende en gran escala del entorno en que se desarrolla).

El incremento importante de víctimas y en pérdidas económicas que se ha producido a lo largo del presente siglo como consecuencia de los efectos del volcanismo es común al resto de los peligros naturales (terremotos, tsunamis, huracanes, inundaciones...).

Esta situación ha provocado una creciente preocupación entre las Autoridades Científicas y

Políticas, decididas a dedicar sus esfuerzos a la prevención y mitigación de los efectos catastróficos de los desastres naturales.

Como consecuencia, en la última década ha tenido lugar la aparición de una serie de iniciativas que incentivan la investigación de todos aquellos aspectos necesarios para la mejor comprensión y análisis de los peligros naturales.

Cabe destacar entre éstas, la proclamación por la Asamblea General de las Naciones Unidas de la **Década Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (IDNDR, 1990-2000)** en su resolución 42/169 de 1987. Esta iniciativa tiene como objetivo "*disminuir substancialmente el impacto que los peligros naturales tienen sobre las vidas humanas, los daños producidos a la propiedad y la interrupción o impedimento a las actividades sociales y económicas*". De acuerdo con este objetivo, en el año 2000 todos los países deberían poseer (IDNDR Committee, 1991):

- conocimientos a nivel nacional de los riesgos asociados con los peligros naturales presentes en su territorio, que se considerarán en los planes de desarrollo.
- planes de mitigación a nivel nacional y/o local que incluyan predicciones a largo plazo y un acercamiento a la población civil.
- acceso a los sistemas de alerta global, nacional y local y capacidad de difusión y comunicación de los estados de alarma.

Como apoyo a la IDNDR, la Asociación Internacional de Volcanología y Química del Interior de la Tierra (IAVCEI, *International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior*), propuso una serie de líneas prioritarias de investigación para la mitigación de los peligros volcánicos durante la década (IAVCEI, 1990).

Para desarrollar estas líneas, seleccionó una pequeña muestra de volcanes de alto interés, a los que denominó **Volcanes de la Década**, con el fin de llevar a cabo una labor internacional y multidisciplinar de mejora y diseño de herramientas que sirvieran de apoyo para la prevención de los desastres volcánicos.

Los 15 Volcanes de la Década seleccionados (tabla 1.3, figura 1.2), se caracterizan porque cada uno presenta una combinación de población bajo riesgo, actividad en distinta medida, infraestructura científica y un compromiso de las Autoridades Políticas a nivel nacional.

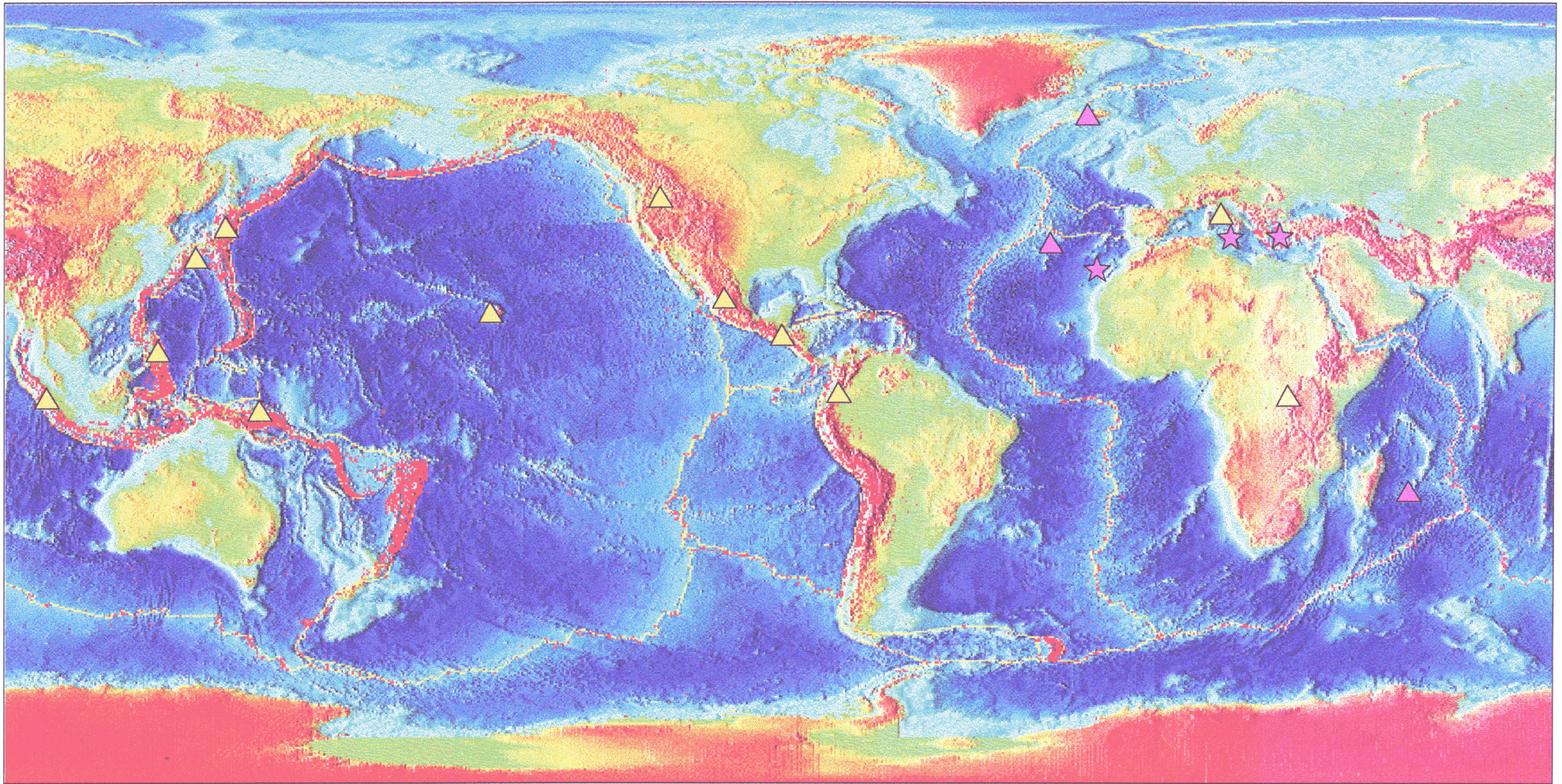
**Tabla 1.3.** Volcanes de la Década.

Nombre	País	Nombre	País
Colima	Méjico	Sta. María/Santiago	Guatemala
Etna	Italia	Santorini	Grecia
Galeras	Colombia	Taal	Filipinas
Mauna Loa	Estados Unidos	Teide	España
Merapi	Indonesia	Ulawun	Papúa Nueva Guinea
Mount Rainier	Estados Unidos	Unzen	Japón
Nyiragongo	Zaire	Vesuvio	Italia
Sakurajima	Japón		

También con enfoque internacional, aunque a menor escala, se constituyen los Programas Marco de Investigación y Desarrollo (1990-1994, 1994-1998) de la Comunidad Europea que, en el Área de Medioambiente, identifican la gestión y prevención de las catástrofes naturales como problemas urgentes en varios países europeos y, en consonancia con la política de la ONU, crean una serie de redes temáticas para establecer un planteamiento integrado y coordinado para enfrentarse a estos problemas.

Entre las tareas de investigación preferentes se incluye el Riesgo Volcánico, centrado para mayor eficacia en el estudio, a través de proyectos transnacionales, de una serie de **Volcanes Laboratorio Europeos (ELV, European Laboratory Volcanoes)**, de los que se pretende la obtención de datos cuantitativos y el desarrollo de modelos físicos con objeto de perfeccionar los métodos de predicción, control y gestión de riesgos. Los 6 volcanes seleccionados para estudio son: Etna (Italia), Santorini (Grecia), Furnas (Portugal), Krafla (Islandia), Pitón de la Fournaise (Francia) y Teide (España).





**Figura 1.2.** Distribución de las áreas volcánicas activas del planeta (límites de placas tectónicas en amarillo), de los seismos con magnitud superior a 5 en la escala Richter ocurridos en la década de los 80 y localización de los Volcanes de la Década ( $\triangle$ ), Volcanes Laboratorio Europeos ( $\triangle$ ) y pertenecientes a ambos programas ( $\star$ ). Imagen base: NOAA-AVHRR.



En España, la **Ley 2/1985, de 21 de enero, sobre Protección Civil**, establece el marco institucional que pone en funcionamiento el sistema de Protección Civil en España y reconoce la necesidad de disponer de una serie de Planes capaces de hacer frente a riesgos genéricos así como, de acuerdo con el proceso actualmente vigente en la UE, Planes para riesgos específicos. La ley prevé dos tipos de Planes: los Territoriales y los Especiales.

Posteriormente, el Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, aprueba la **Norma Básica de Protección Civil**, la cual contiene las directrices esenciales que deben guiar ambos modelos de planificación para conseguir la coordinación necesaria de las diferentes Administraciones públicas. La Norma Básica, dispone en su apartado 6 que el **Riesgo Volcánico** será objeto de Planes Especiales en los ambitos territoriales que lo requieran, y en su apartado 7.2 que éstos requieren para su elaboración la aprobación de una Directriz Básica que establezca los requisitos mínimos sobre los fundamentos, estructura, organización, criterios operativos, medidas de intervención e instrumentos de coordinación que deben cumplir cada uno de los Planes Especiales.

El 21 de Febrero de 1996, la Secretaría de Estado de Interior dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba la **Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo Volcánico**. Entre las funciones básicas del Plan de Comunidad Autónoma se señala, en su apartado 4.3.2, la zonificación del territorio en función de la peligrosidad volcánica, donde se consideran específicamente los Sistemas de Información Geográfica como herramienta para el tratamiento y almacenamiento de los datos obtenidos como resultado de este análisis.

Como consecuencia de todas las iniciativas mencionadas, los programas de investigación volcanológica han recibido un marcado impulso institucional, lo que ha conducido a la realización de numerosos estudios científicos encaminados a proporcionar las bases para la planificación y prevención del riesgo volcánico.

Esta situación resulta especialmente favorable en España, donde la identificación del Teide como Volcán de la Década y Volcán Laboratorio Europeo y la reciente puesta en marcha de la Directriz Básica en Riesgo Volcánico señalan el Archipiélago Canario como el marco idóneo para la realización de este tipo de estudios.

En este contexto, el **Proyecto Teide** (EV5V-CT93-0283, 1993-1995) se ha centrado en la obtención de un conocimiento detallado del volcán Teide y el desarrollo de la tecnología necesaria para el seguimiento de la actividad volcánica.

Entre los numerosos aspectos volcanológicos y relacionados que se han analizado en el proyecto, se encuentra la Evaluación Zonal del Riesgo Volcánico Potencial y de las estrategias para la mitigación de los efectos de una futura crisis volcánica en las Islas Canarias.

El reconocimiento de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta fundamental para el trabajo en Riesgo Volcánico hace necesario el desarrollo de una investigación detallada que permita integrar y adaptar las metodologías tradicionales al entorno informático y hacerlas accesibles a los futuros usuarios.

El desarrollo que las tecnologías y herramientas informáticas para el tratamiento y gestión de datos ha tenido en la última década en distintas disciplinas, proporciona un precedente inmejorable para la utilización de las mismas como base para la realización de estudios que requieran de la gestión y análisis de un gran volumen de información.

## **1.2. Objetivos del estudio.**

El objetivo principal del estudio que aquí se presenta lo ha constituido el Desarrollo de una Metodología para el Análisis y Gestión del Riesgo Volcánico mediante la utilización de las herramientas proporcionadas por los Sistemas de Información Geográfica.

Para alcanzar el cumplimiento de este objetivo, hemos seguido un procedimiento que consta de cuatro fases:

- a) Definición del estudio. Utilizado para identificar,- a partir del análisis de las características de las metodologías clásicas -, los problemas típicos con los que éstas se han enfrentado a la hora de evaluar el riesgo para así establecer la base sobre la que se ha de diseñar la metodología.

- b) Diseño de la metodología. Encaminado a analizar los procedimientos de cálculo y las variables que intervienen en la evaluación del riesgo y a extraer a partir de este análisis las bases de datos que representarán a las variables en el GIS y las operaciones que permitirán obtener la evaluación.
- c) Implementación de la metodología. Llevada a cabo con la aplicación de la misma al estudio del riesgo volcánico en una área "test" de trabajo, previa generación de las bases de datos y operaciones requeridas para el cálculo.
- d) Análisis de los resultados de la evaluación y extracción de conclusiones sobre la operatividad y funcionalidad de la metodología y la utilidad de los Sistemas de Información Geográfica como herramientas de trabajo.

### **I.3. Planteamiento metodológico.**

Tradicionalmente, el problema del riesgo volcánico se ha abordado desde dos perspectivas independientes: la científica y la administrativa (figura 1.3).

En los enfoques estrictamente científicos, se ha hecho énfasis sobre el análisis de la probabilidad de erupción y las características de los fenómenos volcánicos, es decir, en la determinación de la peligrosidad de eventos. Por ello, los estudios se han centrado en:

- la caracterización de los mecanismos eruptivos
- el conocimiento de los sistemas eruptivos y los parámetros de erupción
- la elaboración de modelos de erupción
- la instalación y puesta en marcha de sistemas de vigilancia
- la determinación y análisis de precursores

Por otra parte, desde el punto de vista administrativo,- orientado hacia la protección civil y la gestión del territorio -, el interés se ha centrado básicamente en:

- la localización de los posibles focos eruptivos
- la definición del tipo de erupción más probable y el más destructivo

- la determinación de la evolución y duración de las crisis
- la predicción del área afectada por determinados eventos
- los daños previsibles a la propiedad y la población
- la distribución de los recursos y los medios de apoyo
- la identificación y evaluación de precursores

Sin embargo, el análisis del riesgo potencial al que se ven sometidas las áreas volcánicas activas requiere el estudio, desde un punto de vista científico, no sólo de los factores volcanológicos que lo condicionan, sino también de la influencia que ejercen en el cálculo del riesgo las características socioeconómicas de la zona y de los efectos que las erupciones provocan sobre el medio.

Para que sea posible abarcar el análisis de todos los factores de los que depende el riesgo es imprescindible por tanto adoptar un enfoque integrado o mixto que utilice las técnicas y métodos de análisis desarrollados en diversas disciplinas. Este carácter interdisciplinar de los métodos de análisis del riesgo los convierte en el punto de contacto entre las perspectivas científicas y administrativas (figura 1.3).

Para evaluar el riesgo, generalmente se utilizan ecuaciones que representan procedimientos de cálculo más o menos complejos. La base metodológica que más comunmente se ha utilizado para el análisis del riesgo volcánico es la ecuación desarrollada por el Grupo de Trabajo para el Estudio Estadístico de los Peligros Naturales (UNESCO, 1972b), que interpreta el riesgo como una función compleja de los siguientes factores:

$$\text{Riesgo} = (\text{Valor}) \times (\text{Vulnerabilidad}) \times (\text{Peligro})$$

donde, según la interpretación de Fournier D'Albe (1979) para el riesgo volcánico:

*Valor:* representa el número de vidas humanas en peligro, el valor económico de los bienes y propiedades (edificios, carreteras, etc.) y la capacidad productiva.

*Vulnerabilidad:* mide la proporción del valor que potencialmente se perderá como resultado de un determinado evento volcánico.



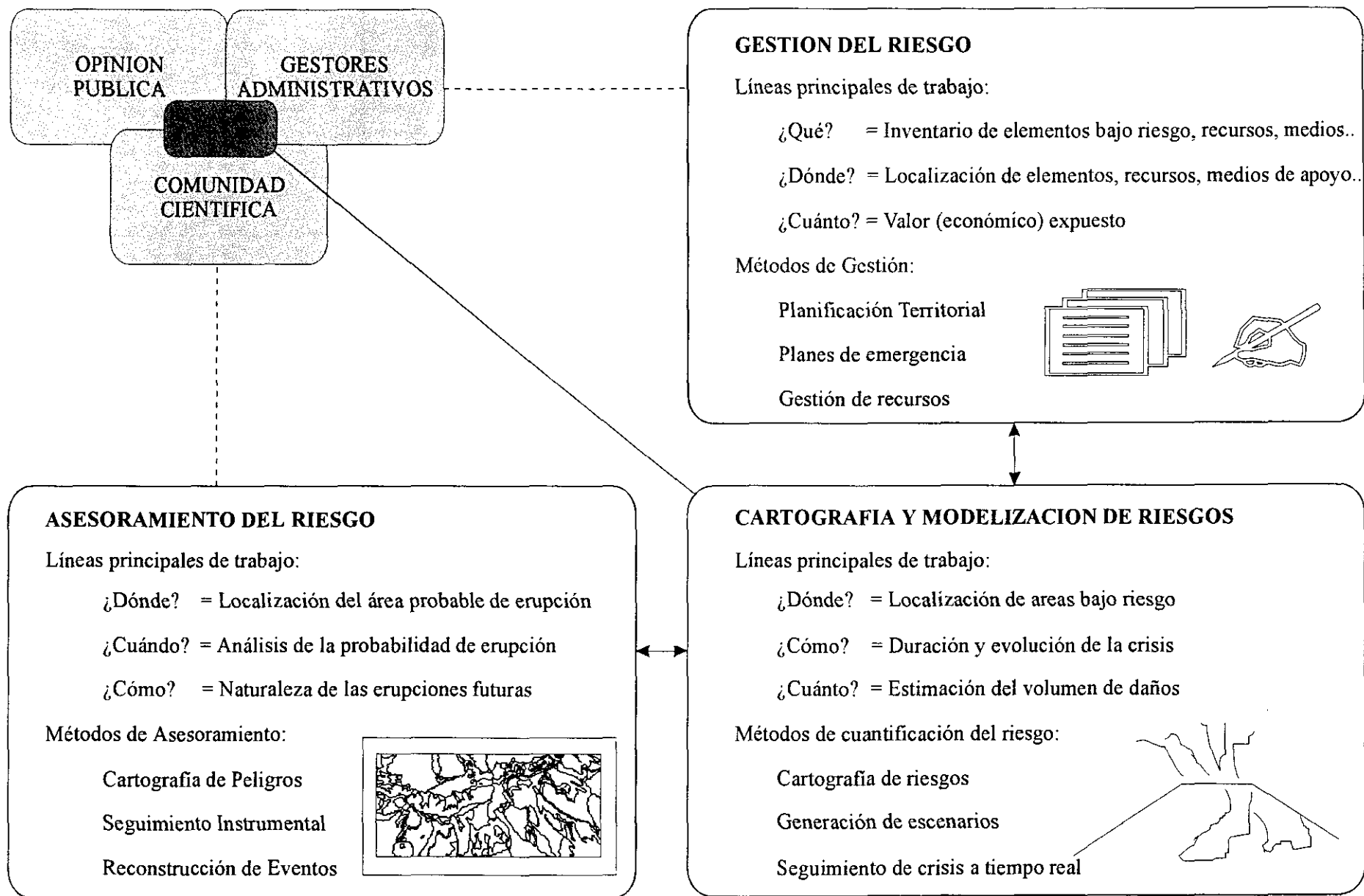


Figura 1.3. Perspectivas en el análisis del riesgo volcánico.

*Peligro:* mide la probabilidad de que un área se vea afectada por cierta manifestación volcánica en un intervalo de tiempo determinado. Es una función compleja que se expresa como la probabilidad de ocurrencia de una erupción de cierta intensidad en un intervalo de tiempo determinado por la probabilidad de que un área se vea afectada por los productos generados en esa erupción.

El objetivo que se ha perseguido con la aplicación de esta ecuación ha sido la generación de mapas que expresen de forma cuantitativa los riesgos potenciales a los que está sometida un área volcánica.

El primer problema que ha surgido a la hora de abordar el cálculo del riesgo tiene su origen en la complejidad que reviste el análisis del factor de peligro, ya que para su estimación se debe disponer de datos sobre: (1) un intervalo amplio del registro histórico y geológico que permita caracterizar la tipología eruptiva, (2) la localización del futuro centro eruptivo y (3) la probabilidad de que se produzca en ese punto una erupción de determinada intensidad y características en un intervalo de tiempo dado.

No existe un método "universal" para evaluar la tipología eruptiva desde un punto de vista cuantitativo. Diversos autores han desarrollado una amplia gama de índices y métodos de clasificación de todo tipo que, para ser aplicables, requieren el conocimiento de un número elevado de parámetros del registro geológico.

La situación con el cálculo de la probabilidad es similar a ésta. En cuanto a la localización del futuro centro eruptivo, es difícil de precisar en áreas donde exista cierta dispersión de centros y la necesidad de fijar un punto único sobre el que llevar a cabo el cálculo elimina del análisis el estudio de la variabilidad espacial que presentan los fenómenos volcánicos.

En el estudio de la peligrosidad se ha asumido generalmente que los parámetros utilizados para el cálculo proporcionan conocimientos suficientes como para cuantificar con precisión la peligrosidad. Sin embargo, las dificultades con las que se enfrentan los estudios para obtener muchos de ellos y la complejidad de los procedimientos de cálculo, han dificultado la obtención de estimaciones precisas en numerosas ocasiones.

Este hecho ha dado lugar a que, comunmente, haya sido posible llegar tan sólo a hacer una estimación en términos cualitativos de los peligros asociados a las áreas volcánicas y una delimitación teórica de las zonas que potencialmente pueden verse afectadas por ellos. En consecuencia, la estimación del riesgo se ha visto limitada debido a que los resultados que proporciona el análisis de la peligrosidad forman parte fundamental de la misma.

El segundo problema que presenta la evaluación del riesgo radica en la forma en la que se expresan los resultados del análisis, la cual se basa en la elaboración de mapas que reflejen los riesgos potenciales a los que está sometida un área volcánica.

Debido a las simplificaciones que se deben asumir al analizar la peligrosidad, su aplicación se limita en muchas ocasiones al conocimiento general de la situación, resultando poco precisos para la elaboración de planes efectivos de previsión y emergencia.

A esto se añade que los mapas son documentos en los que se lleva a cabo una "*representación estática de la realidad*", sobre los que la expresión de procesos dinámicos es imperfecta. Esta situación afecta de forma particular a la cartografía de riesgos, puesto que generalmente se dispone de poca información sobre los procesos que causan el impacto (Alexander, 1993).

Pese a ello, los mapas constituyen todavía una herramienta fundamental para la elaboración de planes de prevención y de ordenación del territorio, por lo que resulta imprescindible una revisión y mejora de los métodos de producción, que subsane las deficiencias actuales y proporcione una mayor precisión en los cálculos (Gupta & Joshi, 1990).

Las dificultades de aplicación que han presentado los métodos convencionales, nos han conducido a plantear la necesidad de diseño de una metodología que permita simplificar el cálculo del riesgo haciendo uso de un número mínimo de parámetros y que subsane el carácter estático que hasta ahora ha supuesto la presentación de resultados.

Debido a la gran cantidad de datos de distinta procedencia que es necesario manejar, hemos adoptado como herramientas para el desarrollo de la metodología los Sistemas de Información Geográfica, donde el tratamiento e integración de los mismos presenta considerables ventajas en comparación con las técnicas convencionales, como por ejemplo:

- La consideración del contexto geográfico en el que se desarrollan los fenómenos volcánicos, debido a la referenciación de los datos con los que se trabaja. Esto permite localizar de forma precisa en el espacio todos los análisis que se realicen.
- Las capacidades integradas para llevar a cabo el análisis espacial y estadístico de los datos y la posibilidad de desarrollo de procedimientos automáticos de cálculo.
- La utilización de herramientas propias para la presentación de los resultados del análisis y la generación de salidas (gráficos, tablas, etc.) adaptadas a las necesidades del usuario.

#### **I.4. Hipótesis de trabajo.**

La ecuación de la UNESCO identifica claramente los factores que determinan el riesgo a que se ve sometida un área de interés, lo que ha permitido su aplicación previa, al menos a nivel cualitativo, al análisis del riesgo en diversas áreas volcánicas. Por este motivo la hemos seleccionado como punto de partida para llevar a cabo el diseño de la metodología.

Identificando las variables que, globalmente, permiten caracterizar cada uno de los factores que intervienen en la ecuación y definiendo claramente el papel que éstas representan en el cálculo, será posible diseñar un procedimiento lógico que conduzca a la estimación del riesgo.

Las variables y procedimientos de cálculo identificados, deberán representarse en el entorno proporcionado por los Sistemas de Información Geográfica a través de bases de datos y cadenas de procesos que reflejen las conexiones existentes entre ellas y sintetizen las operaciones necesarias para el cálculo.

Los GIS van a proporcionar con sus herramientas la clave para superar dos de los obstáculos más importantes a los que se han enfrentado los métodos convencionales de cálculo del riesgo.

En primer lugar, la capacidad de elaboración de procedimientos de cálculo automático va a permitir subsanar el carácter estático que hasta ahora ha supuesto la presentación de los

resultados, ya que se hace posible la generación reiterada de escenarios.

En segundo lugar, la forma en la que se realiza el almacenamiento de los datos en los GIS proporciona información inmediata sobre el contexto en el que se está produciendo el análisis, lo que permitirá introducir en el cálculo medidas que den información sobre la variabilidad espacial de los fenómenos volcánicos.

En el capítulo IV se describe en detalle el proceso que se ha seguido para desarrollar esta hipótesis de trabajo.

## **II. Antecedentes**

---

## II. ANTECEDENTES

La espectacularidad de los fenómenos volcánicos ha dado lugar a que, desde tiempos remotos, existan numerosas observaciones y crónicas en el registro histórico que describen los acontecimientos desencadenados como consecuencia de las crisis volcánicas.

Sin embargo, el estudio detallado de los factores volcanológicos no se desarrolla de forma importante hasta mediados de este siglo. El hecho de que la comunidad científica fuese la primera en ocuparse del análisis de estos fenómenos, motivó que las investigaciones se centrasen principalmente en la caracterización de los mismos, dejando de lado en un principio el análisis de los efectos que provocan a nivel social y económico.

Los estudios volcanológicos clásicos han seguido básicamente dos enfoques. En el primero se han utilizado los métodos geológicos tradicionales para comprender la historia eruptiva de los volcanes y determinar la extensión que alcanzan sus depósitos. El segundo utiliza métodos geofísicos y geoquímicos para identificar cambios en la actividad que puedan ser indicativos de un estado pre-eruptivo. Publicaciones como la de Tilling ed. (1989) presentan una amplia introducción a estos métodos. Los avances técnicos y metodológicos producidos desde el momento en el que se elaboraron estos primeros textos han sido recogidos posteriormente por diversos autores como Araña & Ortiz (1993).

El desarrollo en las últimas décadas de las técnicas de protección civil y de ordenación del territorio ha producido un salto cualitativo en la forma de entender los fenómenos volcánicos y ha permitido la introducción progresiva del concepto de riesgo en los estudios volcanológicos, hasta llegar a su máxima aplicación con motivo de la declaración por la ONU de la *Década para la Reducción de los Desastres Naturales*.

En consonancia con esta nueva visión de la realidad, los avances recientes de las técnicas de simulación numérica han conducido al desarrollo de un tercer enfoque que se combina con los clásicos y que se centra en la modelización de los procesos eruptivos, para identificar sus efectos y diseñar estrategias de mitigación.

La aparición de los Sistemas de Información Geográfica en la década de los 60 introduce una nueva perspectiva en los métodos utilizados para la gestión del territorio. Su aplicación al campo de los riesgos naturales y antrópicos es reciente, ya que las primeras publicaciones se remontan al final de la década de los 80 (ej. Tomlinson, 1985; Burrough, 1986).

En España, los estudios de riesgo se desarrollan a lo largo de las dos últimas décadas, siendo sólo ocasional la utilización de los GIS en los mismos y revistiendo en estos casos un carácter más experimental que aplicado.

En este capítulo hemos abordado el análisis de la evolución y tendencias que el concepto y los estudios de riesgo volcánico han tenido en las últimas décadas, la situación en la que se encuentra el análisis del riesgo volcánico en España y las nuevas perspectivas que la utilización de los GIS han aportado al análisis del riesgo.

### II.1. El concepto de riesgo volcánico.

Desde que en 1972 el *Grupo de Trabajo para el Estudio Estadístico de los Peligros Naturales* (UNESCO, 1972b) definió un standard para el asesoramiento cuantitativo del riesgo, numerosos autores han aplicado esta base metodológica para la realización de estudios de riesgo de toda índole.

En su informe, el Grupo de Trabajo identifica el concepto de riesgo con la posibilidad de que se produzca una pérdida, - sea ésta en forma de vidas humanas, de propiedades, capacidad productiva, etc. -, que depende de tres factores expresados de la forma:

$$\text{Riesgo} = (\text{Valor}) \times (\text{Vulnerabilidad}) \times (\text{Peligro})$$

Posteriormente, la Organización de las Naciones Unidas para la Coordinación de Desastres (UNDRO, 1982), ofrece una visión del riesgo en la cual se consideran tres componentes:

- a) Los **elementos bajo riesgo (E)**, los cuales engloban a la población, propiedades, actividades económicas, servicios públicos, etc., que se encuentran bajo la amenaza de sufrir un desastre en una zona determinada.



- b) El **riesgo específico** ( $R_s$ ), que se entiende como el grado de pérdida susceptible de producirse por un fenómeno natural particular y se expresa como el producto del *peligro natural* (H) y la *vulnerabilidad* (V).
- c) El **riesgo total** ( $R_t$ ), que se refiere al número de vidas que pueden perderse, las personas heridas, los daños a la propiedad y la interrupción de actividades económicas causadas por un fenómeno particular. Es el producto de los dos elementos anteriores:

$$R_t = (E) (R_s) = (E) (H.V)$$

UNDRO (1982) define el riesgo como *"el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultante de la ocurrencia de un fenómeno natural de magnitud determinada. Se expresa con una escala de 0 (sin daños) a 1 (pérdida total)"*.

Tomando como base la ecuación de riesgo de la UNESCO, Fournier d'Albe (1979) considera la interpretación que los factores implicados en el cálculo tienen en términos de riesgo volcánico (vease aptdo. I.3, Planteamiento metodológico), proporcionando una primera base conceptual para la realización de estudios.

Scandone (1983), más adelante, define el riesgo volcánico como una función areal del tipo:

$$R(x,y,t) = P_i(x,y,t) \times D_i(x,y,t)$$

en la que  $P_i$  es la probabilidad absoluta de que un fenómeno volcánico determinado ocurra en un área de coordenadas  $x,y$  en el tiempo  $t$ , y  $D_i(x,y,t)$  es el daño causado por este suceso. La función tiempo está relacionada con la dependencia temporal de las probabilidades eruptivas y con la variación que con el tiempo experimenta el daño causado por una erupción sobre un área determinada.

Otras perspectivas más modernas consideran el riesgo volcánico como una función probabilística resultante del producto de convolución entre las funciones peligrosidad, vulnerabilidad y exposición (en Araña & Ortiz, 1996):

$$<\text{Riesgo}> = <\text{Vulnerabilidad}> \times <\text{Exposición}> \times <\text{Peligrosidad}>$$

donde por exposición se entiende valor expuesto. Según este método, para establecer el riesgo se debe obtener la peligrosidad y la vulnerabilidad para cada punto de la zona de estudio.

En esta misma línea se encuentra la formulación que Valentine & Crowe (1995) hacen del riesgo, al cual definen como la probabilidad de un evento magmático ( $E_{mag}$ ) multiplicada por las consecuencias de ese evento (C):

$$\text{Riesgo} = P\{E_{mag}\} \cdot \{C E_{mag}\}$$

Estos autores consideran que cada expresión a la derecha de la igualdad debe tratarse como una distribución de probabilidad que refleje la incertidumbre de la realidad y que, al utilizar un enfoque de Monte Carlo, induzca a que el riesgo se convierta igualmente en una distribución de probabilidad más que en un valor simple, lo que es típico de estudios deterministas.

Las compañías de seguros también se han introducido recientemente en el campo de la evaluación de riesgos naturales con vistas a establecer las cuotas a pagar en aquellas áreas expuestas a catástrofes. Desde su particular punto de vista, introducen factores en la ecuación de riesgo como la "*percepción del fenómeno*" por parte de la población y la formulación adquiere un carácter aplicado (Tiedemann, 1992):

$$R = C^p \cdot C_a \cdot P(E)$$

donde  $C^p$  es el factor relacionado con la percepción del fenómeno,  $C_a$  caracteriza las causas del riesgo (fenómenos eruptivos en este caso) y  $P(E)$  indica la probabilidad de que ocurra el evento en un lugar y un momento determinado.

En este caso, el análisis del riesgo equivale al establecimiento del "*potencial de daños*" que una zona puede sufrir como consecuencia de un evento, el cual se define como una función compleja que depende del tipo y magnitud de la erupción, la distancia a la fuente, las condiciones meteorológicas, la vulnerabilidad de los elementos de riesgo, la topografía, etc.

## II.2. El análisis del riesgo volcánico.

Desde sus inicios, la investigación volcanológica ha dirigido principalmente sus esfuerzos a la realización de análisis de la componente de peligro, que es la que ha presentado problemas más graves para su tratamiento en el análisis del riesgo.

Los estudios volcanológicos típicos se han centrado en la elaboración de *mapas de peligrosidad* o, lo que es lo mismo, *mapas de zonación de peligros volcánicos*, de los que existen numerosos ejemplos (Booth, 1979; Baker, 1985; Herd & CEV, 1986; Mullineaux et al., 1987; Tilling (ed.), 1989; Fytikas & Vougioukalakis, 1995), la mayor parte de los cuales han estimado el peligro de forma cualitativa (figura 2.1).

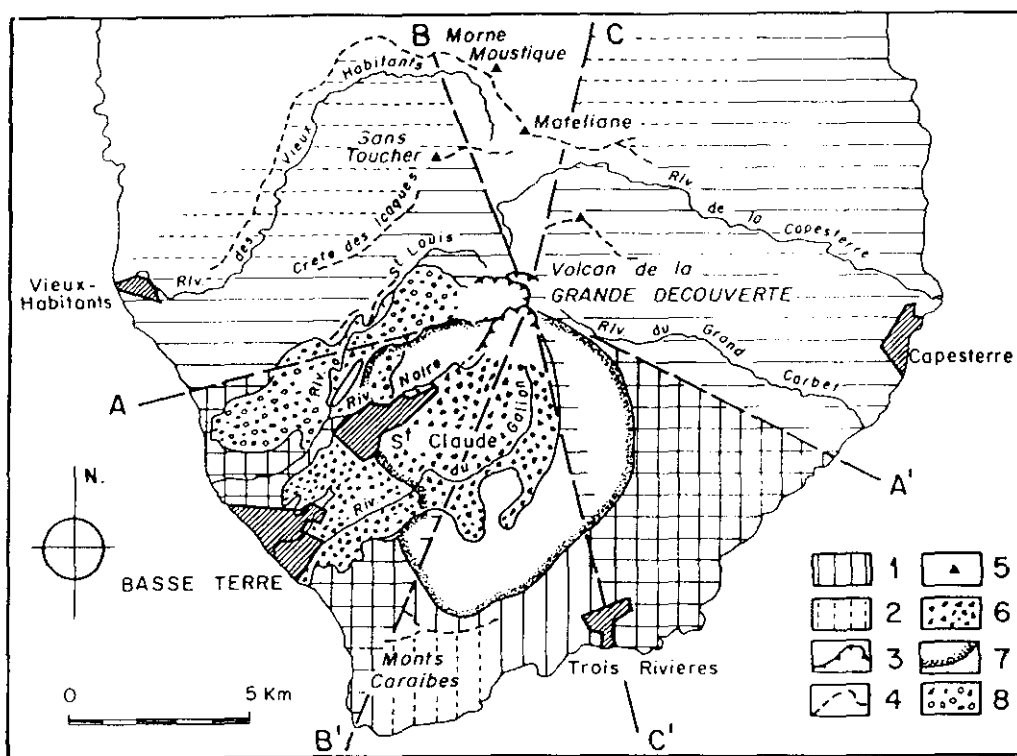
Para determinar la peligrosidad de un área, estos estudios se plantean tres cuestiones principales:

- ¿Cuál es la zona más probable en la que se puede producir una erupción?
- ¿Qué posibilidades hay de que se produzca en un plazo determinado?
- ¿Cuál será su dimensión y su zona de alcance?

En consecuencia, las líneas principales de investigación clásica en volcanología se han ocupado de analizar tres aspectos íntimamente relacionados entre sí que revisaremos más adelante:

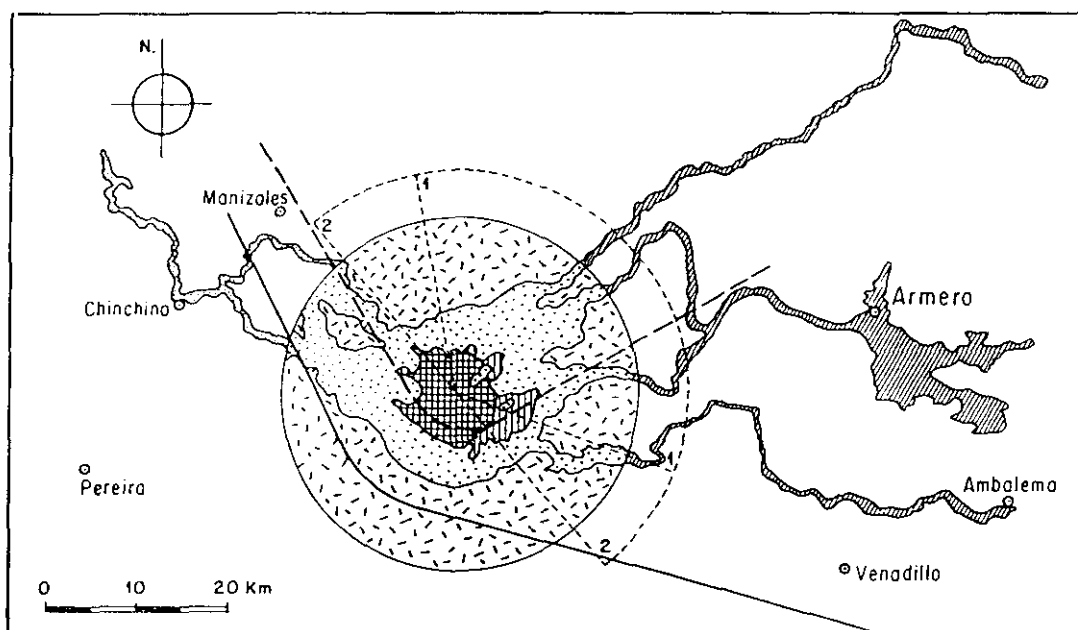
- Localización del área probable de erupción.
- Análisis de la probabilidad de erupción.
- Naturaleza de las erupciones futuras.

Otro enfoque posible en el análisis de la peligrosidad volcánica lo han constituido las investigaciones geofísicas y el seguimiento instrumental (*monitoring*) de los volcanes activos mediante la instalación de equipos y aparatos diversos (redes geodésicas y sísmicas, gravímetros, mareógrafos, etc.) con la idea de establecer niveles de base de actividad e identificar posibles cambios en el comportamiento del volcán (ej. Del Negro, et al., 1995; Ortiz et al, 1995).



**Figura 2.1a.** Límites de las áreas de destrucción potencial por colapso de flancos y explosión lateral dirigida: hacia el sur (AA'), hacia el oeste (BB') y hacia el este (CC') en el volcán de La Grande Decouverte, Antillas Francesas. 1: Área de destrucción total por explosión lateral dirigida; 2: área protegida por el relieve topográfico; 3: cráteres y calderas; 4: relieves principales; 5: principales cimas; 6: avalancha del 3100 a.C.; 7: límite de los depósitos de explosión lateral dirigida en el 3100 a.C.; 8: avalancha del 11500 a.C (en Cheminee et al., 1995).

**Figura 2.1b.** Mapa de zonación de peligros para el Nevado del Ruíz, Colombia (en Tilling, 1989).



A lo largo de los últimos años se ha hecho también un gran esfuerzo para modelizar las erupciones volcánicas. Con ello se ha pretendido reproducir o simular el comportamiento de las erupciones mediante la formulación de sistemas de ecuaciones que se resuelven por métodos numéricos.

Los avances que se han obtenido como consecuencia de la simulación numérica de erupciones (ej. Carey & Sparks, 1986; Valentine & Wohletz, 1989; Macedonio & Pareschi, 1992; Dobran et al., 1994) han proporcionado la base para que surja recientemente un nuevo enfoque que se ocupa de la modelización de los procesos eruptivos, sus efectos y las estrategias de mitigación de los mismos (Valentine & Crowe, 1995). Utilizados en un marco probabilístico, los modelos han proporcionado un medio para predecir las consecuencias de una erupción de forma cuantitativa.

Sin embargo, a pesar del gran potencial que supone la modelización, hasta el momento tan sólo se ha llegado a representar los resultados que se generan con su uso sobre una base geográfica variable (imágenes de satélite, modelos digitales de terreno, información convencional...), la cual se ha utilizado como apoyo para la localización de los depósitos, pero la integración real entre la base geográfica y los modelos no se ha alcanzado aún (ej. Wadge & Isaacs, 1988; Pareschi & Bernstein, 1989; Barberi et al., 1990, 1992).

Por lo que respecta al estudio de la vulnerabilidad de los elementos de riesgo, su evaluación ha resultado difícil debido a la escasez de experiencias recientes en las que se haya hecho una estimación cuantitativa de los daños sufridos como consecuencia de los eventos volcánicos.

Sólo para casos aislados, como por ej. la erupción del St. Helens (1980) o del Pinatubo (1991), ha sido posible un seguimiento preciso (Cook et al., 1981; Wolfe, 1992), lo que ha permitido estudiar los efectos que determinados fenómenos volcánicos han tenido sobre las personas y los bienes materiales.

Con bastante más frecuencia, la vulnerabilidad se ha determinado desde un punto de vista cualitativo, a partir de referencias históricas y de la observación de los efectos que tienen los fenómenos eruptivos (ej. Sekiya & Kikuchi, 1890; Stillwell et al., 1954; Thorarinsson et al., 1973; Tazzief, 1977; Blong, 1984; Johnson, 1988; Peterson, 1988; Yanagi et al., 1992).



En cuanto a la estimación del valor de los bienes expuestos, no ha constituido un tema prioritario en investigación volcanológica, por lo que generalmente los estudios han obviado la referencia al mismo o, lo han considerado de forma indirecta o cualitativa.

### **II.2.1. Localización del área probable de erupción.**

La gran mayoría de estudios de peligrosidad se han llevado a cabo sobre volcanes poligenéticos centrales, donde la localización de las áreas más probables de erupción se asocia generalmente al cráter/es principal/es (ej. Crandell & Mullineaux, 1978; Baker, 1985; Barberi et al., 1992; Wolfe, 1992; Carrasco-Núñez & Galicia, 1995).

Siguiendo este mismo criterio, en aquellas áreas donde la actividad se reparte entre múltiples centros de similar importancia, algunos estudios se han centrado en el análisis independiente de cada uno de ellos como área fuente (ej. Miller, 1988), mientras que otros los han considerado en conjunto sin entrar en análisis sobre la probabilidad comparativa que unos y otros tendrán de entrar en erupción en el futuro (ej. Mullineaux et al., 1987; Hobbli et al., 1987; Miller, 1989).

Frazzeta & Romano (1979) consideran que, en aquellas zonas donde la distribución de centros es lo bastante dispersa como para impedir la determinación precisa del futuro centro de erupción, se hace necesario contar con el apoyo de métodos geofísicos, estructurales y estadísticos que indiquen el área/s más probable/s.

Estos autores señalan que, puesto que las zonas con mayor debilidad cortical son aquellas relacionadas con la mayor concentración de conos y fisuras eruptivas, son éstas en las que existe una mayor probabilidad de que se produzcan erupciones en el futuro. Si además se analizan las alineaciones que siguen los diques y conos, se hace posible determinar las direcciones preferentes en las que se dispondrán los futuros conductos de emisión.

El método de la cartografía de densidad ha sido también utilizado por otros autores (Scandone, 1979; Guest & Murray, 1979; Lowenstein, 1982; Barberi et al., 1995) que han evaluado la distribución de los eventos mediante la construcción de mallas regulares a partir de las cuales se calcula el número de episodios localizados en cada celda.

Otro enfoque utilizado para la caracterización de distribuciones (principalmente para conos de cinder en campos volcánicos), ha sido la realización de estadísticas descriptivas univariantes, como la distancia media al vecino más próximo (Settle, 1979; Connor, 1987a). Sin embargo, éstas no han resultado definitivas para caracterizar heterogeneidades espaciales como la aparición de alineaciones o de agrupamientos (Connor, 1990).

En los últimos años se han introducido nuevas técnicas para el análisis de distribuciones puntuales de centros, como por ejemplo la aplicación de diversos *algoritmos de clustering* (Connor, 1990) o de funciones complejas de probabilidad superficial (Wadge et al., 1994), si bien no se han introducido aún plenamente en este campo.

En cuanto a la identificación de alineaciones de centros, recientemente han aparecido algunos métodos cuantitativos que ayudan en su reconocimiento y evitan la subjetividad que tradicionalmente ha surgido en su interpretación. Los más importantes son la transformada de Hough y la transformada bidimensional de Fourier (Connor, 1990).

### II.2.2. *Análisis de la probabilidad de erupción.*

En los últimos años se ha intentado, - utilizando diferentes métodos y técnicas -, encontrar patrones específicos para la distribución de erupciones que permitan determinar el comportamiento futuro de los volcanes.

Por ej. Wickmann (1966,1976) desarrolló unos modelos Markofianos para la actividad volcánica en los que se expresa la distribución de períodos de reposo de un volcán por medio de dos parámetros equivalentes: la "*función de supervivencia*" y el "*ratio de erupción edad-específico*". Sin embargo, como el propio Wickmann indicó en 1976, la eficiencia de estos modelos nunca llegó a comprobarse con datos reales.

Algunos estudios han encontrado patrones aleatorios de erupción. Esto ha ocurrido por ejemplo para los volcanes Hawaianos (Klein, 1982) o en Stromboli, donde el mecanismo de disparo de la erupción parece ser aleatorio en períodos cortos de tiempo (Settle & McGetchin, 1980).

Otros, por el contrario, han encontrado volcanes que parecen tener un cierto comportamiento periódico. Por ej., Björnsson et al. (1977) hacen referencia a un período de varios cientos de años en la región del Krafla y, las últimas cuatro erupciones de El Chichón (Méjico) parecen haber tenido un período de recurrencia de unos 600 años (Tilling et al., 1984).

La mayor parte de los volcanes han mostrado patrones muy complejos de comportamiento que, generalmente, se desvían de los modelos simples de distribución temporal de ocurrencia (o reposo). Reyment (1969) observa que, aunque algunos patrones de actividad de volcanes se aproximan a un modelo de Poisson, otros se alejan considerablemente del mismo.

En contraste con este hecho, la actividad volcánica considerada desde el punto de vista global, parece mostrar una tendencia clara de Poisson (De la Cruz-Reyna, 1991). Este mismo autor (1993), reconoce la importancia de que exista un registro bien documentado de la actividad histórica para que la identificación de patrones sea correcta.

### **II.2.3. Naturaleza de las erupciones futuras.**

En la determinación de la escala y alcance de una erupción entran en juego un gran número de variables, tanto intrínsecas a la dinámica del proceso eruptivo como externas al mismo (topografía, precipitaciones, régimen de vientos, etc.). En conjunto, su actuación determina el tipo de procesos o fenómenos volcánicos que se manifiestan, su dinámica y la tipología y extensión de los productos, lo que queda reflejado en los depósitos resultantes.

En muchos volcanes, las observaciones de las erupciones históricas han proporcionado una fuente importante de información al respecto a pesar de que, en muchas ocasiones, ha resultado difícil interpretar el registro. La combinación de estos datos con el estudio de los depósitos correspondientes y la observación directa de erupciones han proporcionado información de gran valor sobre el carácter de los procesos eruptivos (Scott, 1989).

Un gran número de estudios se ha ocupado también de analizar el registro geológico debido a la perspectiva que proporciona con respecto a periodos prolongados de actividad,- lo que incrementa las probabilidades de clasificar el rango completo de tipos, escalas y frecuencias eruptivas de un volcán -, o bien por carecer de otras fuentes más recientes de información



(ej. Lowenstein, 1982; Baker, 1985; Latter, 1986; Wadge & Isaacs, 1988; Barberi et al., 1992; Rita et al., 1995; etc.).

Este tipo de investigaciones ha proporcionado información sobre la naturaleza de las erupciones del pasado y se ha utilizado como fuente para la estimación de las características más probables de las erupciones que tendrán lugar en el futuro.

Sin embargo, el no disponer de un método de clasificación común y objetivo que permita cuantificar de forma universal el tamaño de las erupciones, no ha hecho fácil comparar los resultados obtenidos.

Por ello, se ha intentado encontrar un método que permita cuantificar de forma universal el "tamaño" de las erupciones. Los métodos existentes se agrupan entre los que miden la magnitud, la intensidad o ambas.

Uno de los primeros métodos propuestos es el de Tsuya (1955), que clasifica la magnitud en función de los volúmenes emitidos de los distintos tipos de productos volcánicos. Yokoyama (1957) amplía esta clasificación incluyendo en el cálculo la energía liberada en el proceso. Hédervári (1963) define una escala de magnitud-energía que tiene en cuenta las diferentes formas de liberación de energía durante las erupciones. Walker (1980), propone cinco parámetros para caracterizar la intensidad de erupciones explosivas que, en la práctica, son difíciles de medir.

En relación con las medidas de la intensidad se han elaborado varios métodos, la mayor parte de ellos orientados hacia la observación de la máxima altura de la columna eruptiva, el cambio de la forma de la pluma por la acción de vientos cruzados o la dispersión de piroclastos (ej. Carey & Sigurdsson, 1989).

El método más ampliamente utilizado, sin embargo, lo proponen Newhall & Self en 1982 y consiste en una escala basada en el Índice de Explosividad Volcánica (*Volcanic Explosivity Index*, VEI), el cual se define como una estimación compuesta de magnitud y/o intensidad y/o algunos otros parámetros definidos por Walker, dependiendo de los datos disponibles para el cálculo.

### II.3. Los estudios de riesgo volcánico en España.

En España, la única zona en la que se reconoce la existencia actual de actividad volcánica se corresponde con el Archipiélago Canario, donde se ha llevado a cabo la mayoría de las investigaciones destinadas al estudio del riesgo volcánico.

Sin embargo, otras zonas como la comarca de Campos de Calatrava, las islas Columbretes y el pre-Pirineo catalán han experimentado manifestaciones volcánicas importantes a lo largo del cuaternario y en ellas, ocasionalmente, se han realizado aportaciones al estudio del riesgo, como la publicada para la región volcánica de Olot en Gerona (Mallarach & Martí, 1987).

En el Archipiélago Canario, sólo en las dos últimas décadas se ha abordado el estudio del riesgo volcánico. De la totalidad del archipiélago, son las islas de Tenerife y Lanzarote sobre las que se reúne el mayor número de estudios. La presencia del Teide en Tenerife, único volcán central activo en el territorio insular, y la localización en Lanzarote de manifestaciones geotérmicas superficiales, residuos de la erupción histórica con mayor duración y emisión de materiales del archipiélago, son los principales motivos que han convertido a ambas islas en el foco de atención de los estudios de riesgo.

Sin embargo, existen también estudios generales sobre los riesgos potenciales en el resto de las islas del archipiélago con algún tipo de actividad en el Cuaternario. En cualquier caso, las evaluaciones realizadas se han centrado en la estimación cualitativa de los factores de peligro potencial y de sus posibles áreas de influencia basándose en los conocimientos existentes de las erupciones del registro histórico y geológico (ej. Bravo, 1980; Booth, 1984; Alonso, 1986; Tomblin, 1986; Carracedo, 1988; Martí et al., 1994c), habiendo sólo un escaso desarrollo de la cartografía de riesgos (ej. Araña, 1988a; Carracedo et al., 1990).

En todos estos casos, el análisis del riesgo se ha llevado a cabo desde una perspectiva estrictamente científica, sin haberse realizado valoraciones formales desde el punto de vista de la Protección Civil. Esto se debe a la falta de una Normativa que establezca las líneas maestras de trabajo y las competencias que las distintas Administraciones coexistentes en el archipiélago deben asumir en materia de gestión y prevención del riesgo volcánico.

La aprobación, en febrero de 1996, de la Directriz básica de Planificación para Riesgo de Erupciones Volcánicas, constituye el último de una serie de pasos que permitirá elaborar los correspondientes Planes de Emergencia (Estatal y de Comunidad Autónoma).

Sin embargo, dado que Canarias es la única región española en la que se presenta el riesgo volcánico, la Administración Central dispone actualmente de dos planes de emergencia: el *Plan de Emergencia para Erupciones Volcánicas*, de 1982 y actualizado en 1986, elaborado por el Gobierno Civil de Las Palmas y el *Plan de Emergencias en Situaciones de Crisis Sísmicas y Volcánicas* (PLANCRISCAN), elaborado en 1989 y actualizado en 1992 por el Gobierno Civil de Sta. Cruz de Tenerife, los cuales se ocupan de la gestión del riesgo en cada una de las dos provincias Canarias.

Estos dos planes se elaboraron como respuesta a la necesidad de contar con una base en el caso de que se produjese una crisis volcánica, pero carecen de una fundamentación científica amplia en su elaboración y no responden a la estructura de Protección Civil establecida por la nueva normativa (Sansón, 1996).

Pese a la falta de evaluaciones rigurosas del riesgo en el archipiélago, existe sin embargo, una gran cantidad de información aportada por las numerosas investigaciones dedicadas al análisis detallado del registro geológico, lo que ha permitido reconstruir con bastante fiabilidad la historia eruptiva del archipiélago (ej. Schmincke, 1982).

Los datos recopilados por estos estudios, resultan altamente valiosos para la evaluación adecuada del riesgo volcánico. Sólo en Tenerife, por citar la isla donde existe mayor profusión de análisis, las investigaciones dedicadas a recopilar datos sobre los aspectos más significativos del volcanismo de la isla cubren un amplio abanico (petrología, estratigrafía, geoquímica, geocronología, etc.). Como ejemplo, se pueden citar los trabajos de Alonso, 1989; Ancochea et al., 1989; Araña & Coello (eds.), 1989 y de la Nuez et al., 1993.

En cuanto al volcanismo histórico,- del que no existe un registro importante -, también ha sido objeto de amplio estudio en el archipiélago (ej. García Moral, 1989; Romero, 1991), proporcionando una base para el análisis de la vulnerabilidad del medio frente a los procesos eruptivos y del comportamiento de los fenómenos asociados.

Este tipo de investigaciones, en conjunto, ha servido de base para llevar a cabo el análisis de la peligrosidad potencial de eventos futuros en las islas y estimar las características típicas de los fenómenos asociados.

Otra línea de trabajo desarrollada en el archipiélago, y de importante significación para la evaluación del riesgo, la ha constituido el análisis sobre la localización de futuros centros eruptivos. Son pocos los estudios realizados (ej. Carracedo, 1993), si bien muchos autores mencionan la distribución de centros en torno a una serie de alineaciones con significado tectónico regional (ej. Coello & Bravo, 1989), aunque sólo algunas investigaciones profundizan más en el análisis objetivo de este tema (ej. Ancochea et al., 1995).

En cuanto al análisis de parámetros geofísicos y geodésicos, en la última década se han llevado a cabo una serie de investigaciones (ej. Mezcua et al., 1989; Vieira & Sevilla, 1989; Ortiz et al., 1995) centradas principalmente en Tenerife y Lanzarote, las cuales han permitido no sólo importantes avances en instalación de redes de vigilancia, sino también la evaluación de la estructura interna de las islas.

El desarrollo de nuevas investigaciones en el período 1993-1995 en el marco del proyecto Teide (EV5V-CT93-0283, 1993-1995), ha ampliado los conocimientos adquiridos previamente (ej. Bryan, 1995; Martí et al., 1995), lo que ha permitido reconstruir con precisión el marco evolutivo del volcanismo en la isla de Tenerife y caracterizar su actividad eruptiva (ej. Araña et al., 1994; Martí et al., 1994a, 1994c; Ablay et al., 1995).

#### **II.4. El potencial de los Sistemas de Información Geográfica.**

El uso del término Sistema de Información Geográfica (*Geographical Information System, GIS*) se remonta a la mitad de los años 60, momento en el que parece haberse originado en el marco de dos contextos bastante diferentes.

En Canadá, se utilizó por primera vez para hacer referencia al ordenador y los periféricos que se utilizaban en la gestión y proceso de los datos obtenidos por el Inventario de Tierras de Canadá. Su principal característica era la capacidad de superponer simultáneamente la información contenida en varios mapas.

Casi al mismo tiempo, en Estados Unidos se concebía un sistema capaz de extraer los datos apropiados de grandes bases de almacenamiento, - que se utilizaban para su aplicación en el análisis de modelos complejos de transporte -, y de representarlos en forma de mapas (Coppock & Rhind, 1991).

Las técnicas empleadas en GIS han evolucionado considerablemente desde estos momentos iniciales, particularmente en los últimos 15 años (Goodchild, 1993), y sus aplicaciones se han extendido hasta ocupar un amplio rango de utilidades que va desde el análisis y modelización sofisticados de datos espaciales a la simple gestión o inventario de datos.

Actualmente, los avances principales se articulan en torno al desarrollo de sistemas híbridos (véctor-ráster) y la integración del GIS y los Sistemas Expertos. Como primer paso, se ha comenzado a utilizar los GIS como sistemas de apoyo en la toma de decisiones (Parent & Church, 1989; Fedra & Reitsma, 1990).

Los GIS se aceptan comunmente como herramienta para el seguimiento y elaboración de mapas temáticos, cartografía, geografía, planificación urbana y regional y control de recursos (Smyrnew, 1990; Scholten & Stillwell eds., 1990).

Las aplicaciones medioambientales en sentido general son las más corrientes, habiendo numerosas iniciativas para la integración de bases de datos medioambientales y geográficas en numerosos países de todo el mundo, la mayor parte de los países Europeos (ej. van Est & de Vroege, 1985; Jackson et al., 1988; Sucksdorff et al., 1989; Ardizzone et al., 1991), a nivel Comunitario (ej. Wiggins et al., 1986), o a nivel global en el marco de las Naciones Unidas.

Posiblemente, el área en la que más se han utilizado los GIS para el análisis de riesgos es la que comprende los riesgos para la salud, entendidos desde el punto de vista del control de enfermedades o brotes epidémicos (ej. Gatrell & Dunn, 1990), exposición a factores de peligro (emisiones tóxicas, contaminación de aguas, etc.), o como herramienta de decisión en la identificación de áreas para la localización de instalaciones peligrosas o molestas (centrales nucleares, vertederos...) (ej. von Braun, 1993).

Con respecto a los peligros naturales, los Sistemas de Información Geográfica tienen amplia difusión en estudios relacionados con la desertificación (ej. Spanner et al., 1983; Bocco, 1990), los deslizamientos de tierras (ej. Wadge, 1988; Gupta & Joshi, 1990; Brass et al., 1991; Wadge et al., 1993) y, recientemente, el riesgo sísmico (ej. Pascual et al., 1994), encontrándose las aplicaciones al riesgo volcánico en una fase preliminar en la mayoría de los casos, aunque excepcionalmente han alcanzado un gran desarrollo en algunos países (ej. Comisión Nal. de Emergencia - Gobierno de Costa Rica, 1995).

Para desarrollar este tipo de estudios, como veremos en detalle más adelante, se recurre habitualmente al manejo de un gran volumen de datos de muy diversa índole (topografía, usos del suelo, estadísticas de población, información administrativa, geología, datos meteorológicos...) que es necesario recopilar directamente de las fuentes que se ocupan de su gestión (Ministerios, Administraciones locales, etc.), las cuales, suelen carecer de un procedimiento unificado y estándar para su producción y almacenamiento.

Esta situación convierte el proceso de recopilación e introducción de datos en el GIS en la tarea más laboriosa de todas las que intervienen en el desarrollo de cualquier análisis. Sin embargo, en los últimos años han surgido diversas iniciativas, principalmente por parte de las Administraciones públicas con competencias en la ordenación, gestión y planificación del territorio para centralizar y unificar las bases de datos que utilizan al elaborar planes integrados.

Como resultado, se han desarrollado en las últimas décadas un tipo de sistemas para la gestión informatizada de bases de datos, similares a los GIS, los cuales reciben la denominación de Sistemas de Información Territorial (*Land Information Systems, LIS*), cuyas características generales y diferencias con los GIS se exponen en el siguiente capítulo. Las bases de datos almacenadas en los LIS pueden resultar de gran utilidad en el desarrollo de aplicaciones destinadas al estudio de los riesgos naturales o antrópicos.

Existen casos específicos en los que estos sistemas se han desarrollado con el propósito de permitir la ordenación eficiente y racional de áreas expuestas a peligros naturales de elevada incidencia con un período de retorno pequeño como, en el caso del riesgo volcánico, ocurre con el LIS desarrollado en el área Circumvesubiana (Massone et al., 1996).

Con mucha mayor frecuencia, el objetivo es el de almacenar, explotar y analizar información territorial de diversa índole. Este es por ej. el caso en nuestro país del Sistema de Información Territorial desarrollado por el Cabildo Insular de Tenerife como ayuda a la planificación insular y como medio de integración de las actividades de gestión relacionadas con el territorio (proyecto Anaga).

Este proyecto es un ejemplo claro del tipo sistema generado para la gestión del territorio, en el cual, de las bases de datos implementadas, las más significativas desde el punto de vista del riesgo son las que aportan información sobre la topografía, usos del suelo, infraestructuras viarias, de saneamiento, redes eléctricas, equipamientos municipales, etc.

En cuanto a los enfoques que se pueden seguir para la modelización de los riesgos, es el empírico o inductivo el que más se ha utilizado en todos los tipos de aplicaciones, ya que es fácil de implementar en los GIS. El enfoque determinista o deductivo se ha asociado generalmente a los modelos de simulación, que han constituido hasta la fecha programas independientes más que un componente interno del GIS (Wadge et al., 1993).

Esta situación es común a los diversos campos de aplicación de los GIS. Sin embargo, aun cuando la integración de modelos de simulación de procesos en el marco de los GIS no se haya llevado a cabo hasta el momento, la idea de esta integración existe y se ha discutido frecuentemente (ej. Granger, 1989; Fedra, 1990b; Lam & Swayne, 1991).

### **III. Los Sistemas de Información Geográfica**

---



### III. LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA

El aumento de la necesidad de eficiencia en el almacenamiento, análisis y despliegue de datos medioambientales complejos y voluminosos ha conducido en los últimos años al uso de los ordenadores para su manejo y a la creación de sistemas de información sofisticados.

Actualmente son varios los tipos de sistemas de información existentes en el mercado, aunque su funcionalidad y capacidad de gestión de datos varía de unos a otros. Por este motivo, la elección del sistema en el que se va a llevar a cabo el estudio condiciona de forma significativa el tipo de aplicaciones al que va a ser posible destinarlo.

La aparición de los **Sistemas de Información Geográfica (SIG/GIS)** ha supuesto, frente a otros tipos de sistemas de información, una renovación en los procedimientos de adquisición de datos y en los métodos analíticos utilizados para su tratamiento. Su versatilidad en la gestión de datos geográficos es el motivo principal por el que los hemos elegido como plataforma para el desarrollo de la metodología para la evaluación del riesgo.

A lo largo de este capítulo se presentan aquellos aspectos y características de los GIS que han influido de forma más directa sobre el diseño y posterior implementación de la metodología por haber condicionado tanto los criterios como los procedimientos de trabajo.

#### III.1. Tipos de Sistemas de Información.

Antes de comenzar el desarrollo de las características principales de los GIS es importante establecer la distinción que existe entre éstos y otros tipos de sistemas de información con los que comunmente se los relaciona y confunde (figura 3.1).

##### III.1.1. *Sistemas de Diseño Asistido por Ordenador (Computer Assisted Design, CAD).*

Los sistemas CAD son sistemas gráficos que se utilizan en diseño industrial y arquitectura (entre otras disciplinas) como apoyo en la visualización del trabajo que se desarrolla.

Estos sistemas permiten el dibujo automático, la utilización de herramientas de diseño (cambios de escala, localización, zoom, rotación y edición) y la presentación de esta información con un formato profesional.

El GIS está directamente relacionado con el concepto de base de datos mientras que el CAD está más relacionado con el proceso de diseño y el uso de símbolos de acompañamiento. Los sistemas CAD trabajan con cantidades limitadas de datos y no permiten a los usuarios asignar de forma automática una simbología utilizando unos criterios definidos. Sus capacidades analíticas son muy limitadas.

### **III.1.2. *Sistemas de Cartografía Automática (Computer Assisted Mapping, CAM).***

Estos sistemas se centran en la extracción de datos, su clasificación y su representación simbólica de forma automática (Cowen, 1988). Su poder se centra en la representación más que en el mismo hecho de extraer y analizar los datos.

Utilizan estructuras de datos simples que carecen de información sobre su topología. Pueden tener conexiones con sistemas de gestión de bases de datos, pero sólo puede accederse a éstos con una operatividad muy limitada.

Los sistemas de cartografía automática generalmente tienen numerosas herramientas para el diseño de mapas y la producción de salidas gráficas de alta calidad en formato vectorial.

### **III.1.3. *Sistemas de Información Territoriales (Land Information Systems, LIS).***

El objetivo de este tipo de sistemas de información es el de funcionar como un sistema administrativo para la gestión de datos geográficos de usos del suelo y, en este sentido, el LIS es similar a algunas tendencias de CAD. En este tipo de sistemas de información el punto central es el desarrollo de una base de datos muy detallada. Sin embargo, hay herramientas disponibles en este tipo de sistemas que permiten almacenar, integrar, actualizar y desplegar datos con muy alto grado de precisión. Apenas se llevan a cabo análisis espaciales o geográficos.

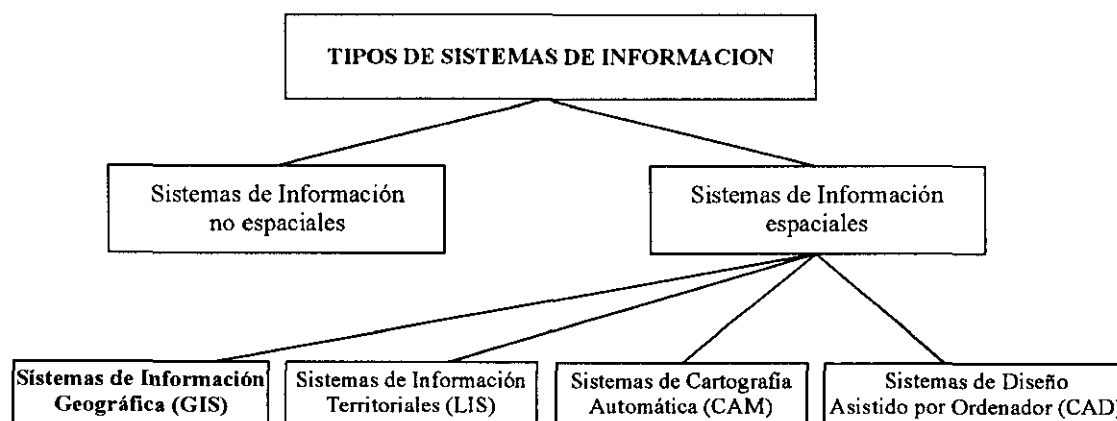
### III.1.4. Sistemas de Información Geográfica (GIS/SIG).

Burrough (1986) propuso una de las definiciones más citadas de Sistema de Información Geográfica: *"un conjunto poderoso de herramientas para reunir, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y desplegar datos espaciales del mundo real"*.

En GIS, los objetos del mundo real se describen por medio de entidades geográficas, las cuales se componen a su vez de dos tipos de datos: los datos espaciales (también llamados geográficos o de situación) y sus atributos.

Las entidades geográficas ayudan, por tanto, a describir los objetos del mundo real en términos de (a) su posición con respecto a un sistema de coordenadas conocido, (b) sus atributos o características que no tienen relación necesaria con la posición (como el color, coste, pH) y (c) sus interrelaciones espaciales (*relaciones topológicas*), que describen cómo están ligados entre sí o cómo se puede viajar entre ellos.

Los GIS se utilizan en contextos muy diversos como, por ejemplo, para asistir en la formulación de la política a seguir con respecto a diferentes aspectos de la planificación medioambiental o de la planificación económica o estratégica. Estos sistemas de información se centran en el desarrollo de la base de datos y de las herramientas que permitirán recuperar, gestionar, actualizar o presentar los datos.



**Figura 3.1.** Relaciones entre GIS, CAD, LIS, cartografía automática y otros tipos de sistemas de información.

Una diferencia primordial entre GIS y LIS se encuentra en el orden de precisión de los datos que se mantienen en el sistema y en las operaciones que se realizan con éstos. Otro rasgo distintivo del GIS en comparación con el LIS, el CAD y la cartografía automática es la disponibilidad en el GIS de las herramientas necesarias para ejecutar análisis espaciales.

### **III.2. Funcionalidad de los Sistemas de Información Geográfica.**

Podemos identificar tres funciones principales que todo GIS debe cumplir (Scholten & Stillwell, 1990) para que sea considerado como tal:

En primer lugar, está el almacenamiento, gestión e integración de grandes cantidades de datos espaciales referenciados. Los datos proceden usualmente de una gran variedad de fuentes y uno de los rasgos más importantes de un GIS es su facilidad para integrarlos llevándolos a un marco espacial común.

El segundo objetivo principal de un GIS es el de proporcionar los medios suficientes para ejecutar análisis de todo tipo que estén relacionados específicamente con la componente geográfica de los datos.

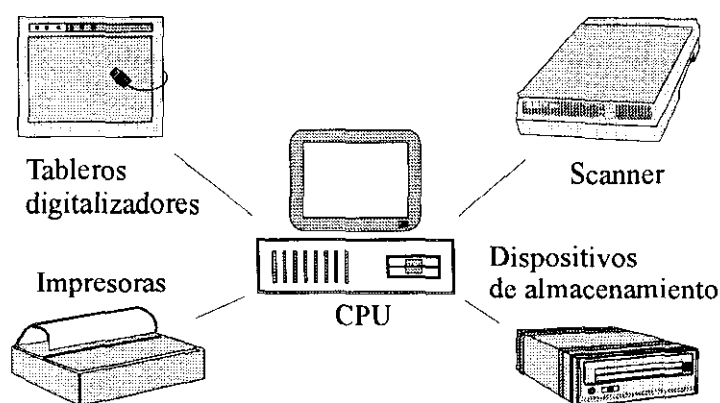
La tercera tarea principal de un GIS implica la organización y gestión de grandes cantidades de datos de tal forma que la información sea fácilmente accesible a cualquier usuario. Un GIS debe también ser capaz de desplegar los datos en mapas de alta calidad. Estos mapas son un producto implícito de todo el trabajo que se lleva a cabo. Sin embargo, para muchos propósitos diferentes se pueden requerir otras formas de despliegue de datos, frecuentemente para su uso en combinación con mapas.

### **III.3. Componentes de los Sistemas de Información Geográfica.**

Los sistemas de información geográfica tienen tres componentes de los que no es posible prescindir: el hardware, el conjunto de módulos de aplicación o software y un contexto organizativo apropiado (Burrough, 1986). Estos tres componentes tienen que estar en equilibrio para que el sistema funcione satisfactoriamente.

### III.3.1. Hardware.

Los componentes del hardware de un GIS están representados en la figura 3.2. El ordenador o CPU puede ser casi cualquier tipo de plataforma, como PCs, estaciones de trabajo, etc. Además de los dispositivos estándar de entrada, salida y almacenamiento, son necesarios periféricos específicos para la entrada (p.e. scanners o tableros digitalizadores), salida (p.e. plotters o impresoras) y, en ocasiones, para el almacenamiento y proceso de datos.



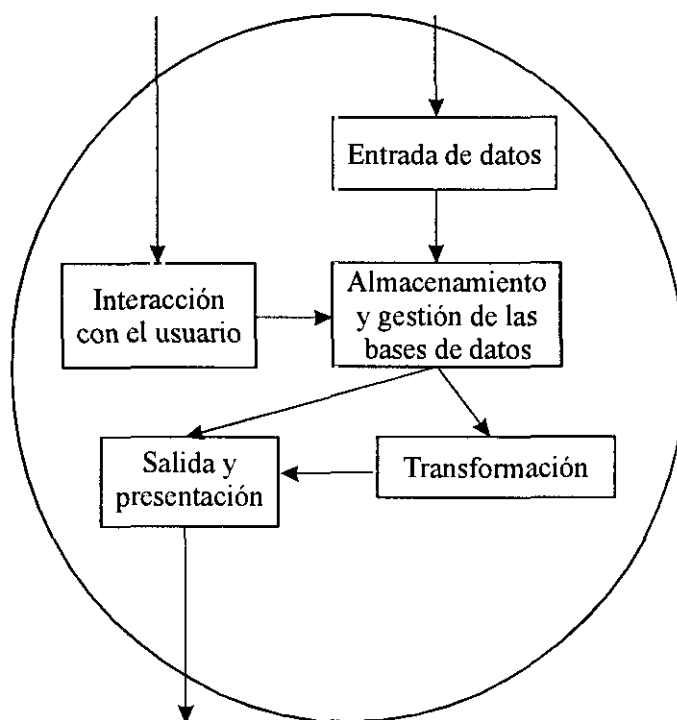
**Figura 3.2.** Componentes del hardware de un Sistema de Información Geográfica (a partir de Burrough, 1986).

En nuestro caso, hemos elegido como plataformas de trabajo sistemas tipo PC debido a su facilidad de mantenimiento y su tolerancia y compatibilidad con una amplia gama de periféricos y de programas de aplicaciones.

### III.3.2 Módulos software de GIS.

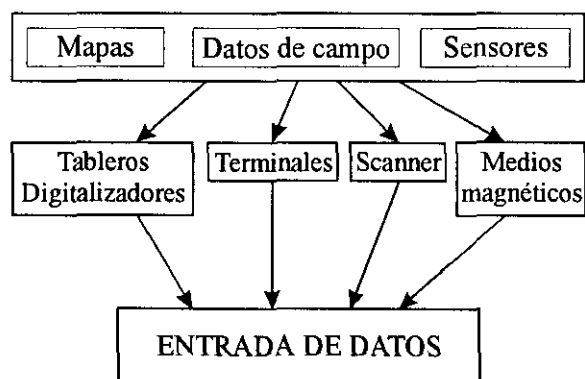
El paquete de software de un Sistema de Información Geográfica consta de cinco módulos básicos (figura 3.3). Estos módulos básicos son subsistemas que se ocupan de:

- (a) la entrada y verificación de datos
- (b) el almacenamiento y gestión de las bases de datos
- (c) la salida y presentación de datos
- (d) la transformación de datos
- (e) la interacción con el usuario



**Figura 3.3.** Componentes del software de un Sistema de Información Geográfica (Burrough, 1986).

La entrada de datos (figura 3.4) cubre todos los aspectos de la transformación de datos existentes en forma de mapas, datos de campo y sensores (incluyendo fotografía aérea, datos de satélite e instrumentos de medida) a un formato digital compatible.



**Figura 3.4.** Entrada de datos (Burrough, 1986).

El almacenamiento y gestión de datos (figura 3.5) se ocupa de la forma en la que los datos relativos a la posición, relaciones (topología) y atributos de las entidades geográficas se estructuran y organizan, tanto en lo que respecta a su manejo en el ordenador como a la forma en la que los usuarios del sistema van a percibirlos. El programa que se utiliza para organizar los datos se conoce como **Sistema Gestor de Bases de Datos** (*Database Management System, DBMS*).

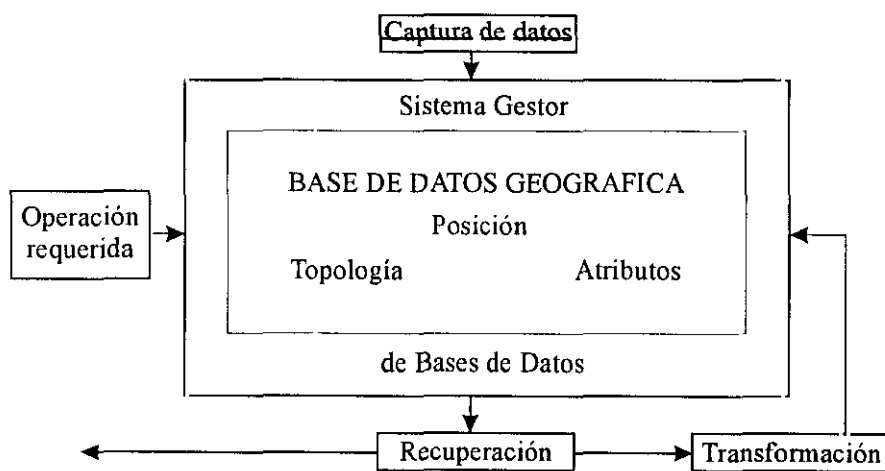


Figura 3.5. Componentes de la base de datos geográfica (Burrough, 1986).

La salida y presentación de datos (figura 3.6) está relacionada con el modo en el que se presentan los datos y los resultados de los análisis. Los datos se pueden presentar como mapas, tablas y figuras, utilizando para mostrarlos desde pantallas gráficas a salidas en impresora o plotter así como en formato digital por medio de soportes magnéticos diversos.

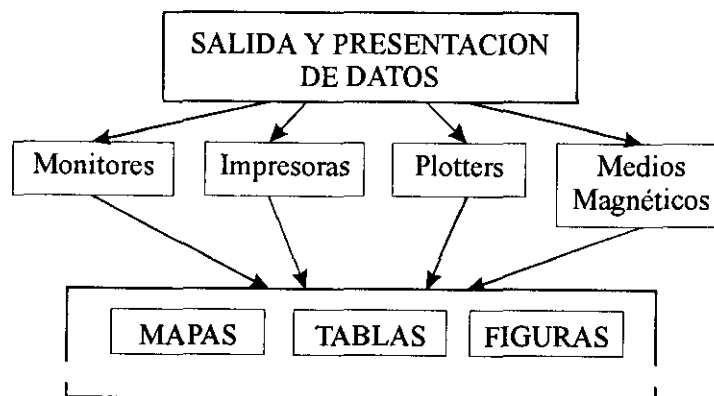


Figura 3.6. Salidas de datos (Burrough, 1986).

La transformación de datos (figura 3.7) engloba a dos tipos de operaciones: (a) el grupo de transformaciones necesarias para eliminar errores, actualizar y ajustar los datos y (b) los métodos de análisis que se pueden aplicar para conseguir respuestas a las preguntas hechas al GIS.

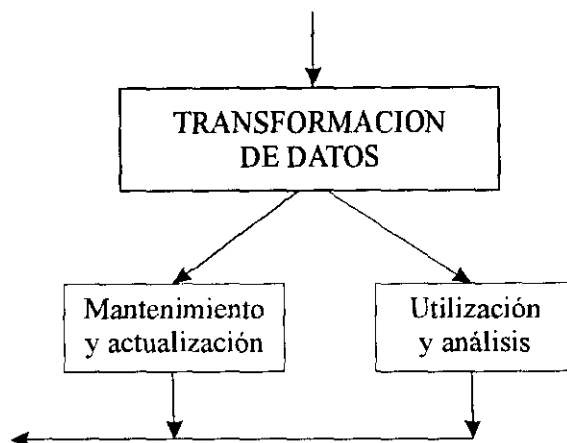


Figura 3.7. Transformación de datos (Burrough, 1986).

Por último, el módulo de interacción con el usuario se ocupa de proporcionar los medios para acceder a los demás subsistemas y realizar las operaciones que el usuario desee.

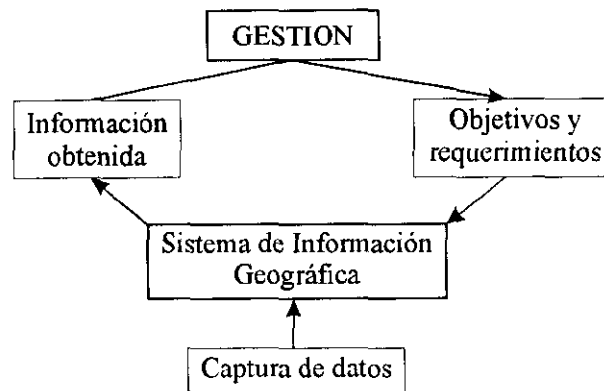
El software que se vaya a utilizar en la realización del estudio debe cumplir los requisitos básicos que permitan el funcionamiento completo de cada uno de los subsistemas indicados. Por ello, para llevar a cabo la implementación de la metodología hemos seleccionado el sistema ILWIS (*Integrated Land and Water Information System*), dada su amplia capacidad para integrar, gestionar y presentar datos geográficos de todo tipo, sus numerosas herramientas de análisis y su facilidad de manejo (Anexo A).

### III.3.3. Los aspectos organizativos de un GIS.

Los cinco subsistemas de un GIS gobiernan la forma en la que la información geográfica se puede procesar pero no garantizan en sí mismos que se pueda utilizar efectivamente. Para que toda la información que se introduce en el sistema resulte útil y manejable es necesario organizarla adecuadamente en **bases de datos** (figura 3.8).



La selección de las bases de datos que serán necesarias para llevar a cabo la evaluación del riesgo se desarrolla en detalle en el capítulo IV.



**Figura 3.8.** Aspectos organizativos de un Sistema de Información Geográfica (Burrough, 1986).

#### III.4. Organización de datos en un GIS: el Sistema Gestor de Bases de Datos.

Debido a la diversidad de las fuentes de las que proceden los datos que se utilizan en GIS (mapas, bibliografía, fotografías aéreas, imágenes de satélite, trabajo de campo, etc.), el volumen de información que es necesario procesar es muy importante.

El almacenamiento de la información en bases de datos proporciona la posibilidad de ejecutar un conjunto de operaciones que son necesarias para la manipulación de los atributos. Entre estas operaciones destacan las siguientes:

- Creación de nuevas bases de datos a partir de las existentes.
- Adición de nuevos datos a un conjunto ya existente.
- Actualización y/o transformación de los datos.
- Marcación o señalización de datos.
- Eliminación de datos.

Para poder acceder y organizar de manera eficaz la información incluida en una o más bases de datos y llevar a cabo todas estas operaciones se necesita utilizar un conjunto de programas denominados **Sistema Gestor de Bases de Datos** (*Data Base Management System, DBMS*).

Un Sistema Gestor de Bases de Datos es esencialmente un sistema computerizado que almacena información, es decir, un sistema cuyo propósito es mantener los datos y hacerlos accesibles cuando existe demanda de ellos.

La base de datos de un Sistema de Información Geográfica contiene información sobre la posición y las características de las entidades geográficas con las que se trabaja. En función de esta distinción, se habla comunmente de dos tipos de bases de datos:

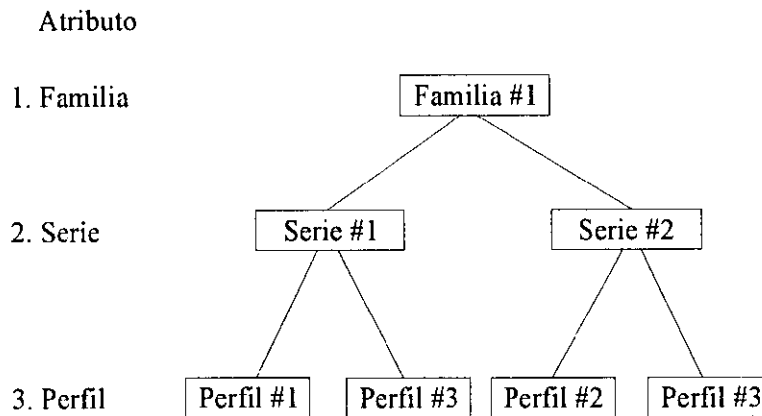
- (1) *Base de datos gráfica (o de datos de situación)*. La información espacial gráfica incluye a los atributos con una localización espacial, extensión o configuración. Estos atributos geométricos (espaciales) pueden ser de tipo métrico o topográfico.
- (2) *Base de datos alfanumérica (o de atributos)*. Engloba a aquellas propiedades que pertenecen a una entidad espacial pero que no tienen carácter espacial por sí mismas (ej. pH, color, densidad...).

Para que un GIS pueda ser funcional, su característica más importante debe ser la capacidad de mantener los nexos de unión existentes entre la base de datos gráfica y alfanumérica. Para conseguirlo, es necesario que exista un método de organización de las mismas. Basándose en el tipo de estructura que se utiliza, se pueden diferenciar tres clases principales de sistemas de organización de bases de datos: jerárquico, en red y relacional (Burrough, 1986).

#### III.4.1. *Sistemas jerárquicos.*

Se utilizan cuando entre los datos existen una o varias relaciones. Los datos se organizan siguiendo una estructura de árbol. En los modelos jerárquicos cada elemento solamente tiene uno de rango superior (figura 3.9).

La ventaja de este modelo es que es fácil de entender, actualizar y extender. El acceso a los atributos principales o de primer orden no presenta problemas. Sin embargo, obtener información de los atributos asociados es muy difícil. Por ello esta estructura solamente es válida en aquellos casos en que las relaciones entre los atributos se conocen previamente.



**Figura 3.9.** Estructura de Base de datos Jerárquica.

#### **III.4.2. Sistemas en red.**

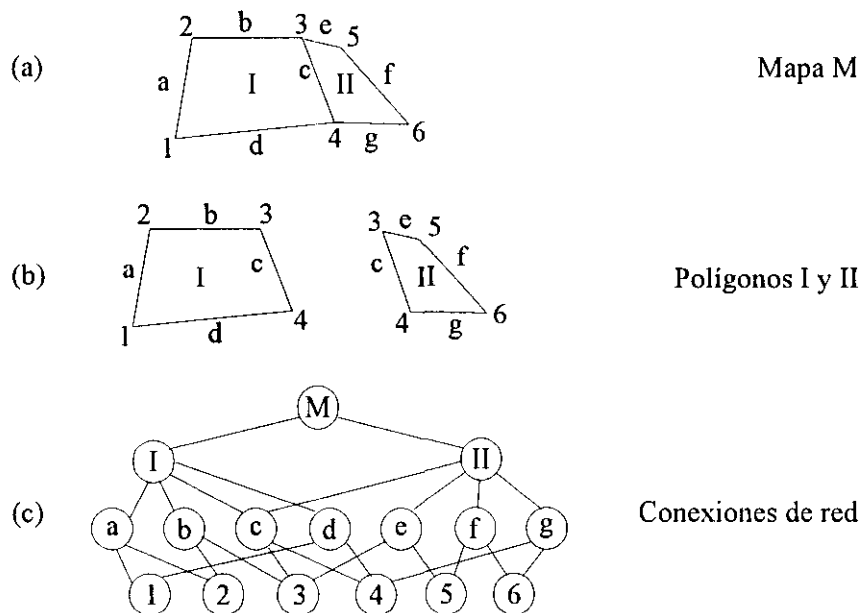
En el sistema jerárquico tan sólo se puede ir hacia arriba o hacia abajo dentro de los caminos preestablecidos. Sin embargo, hay veces en que es necesario establecer relaciones entre distintos tipos de datos y los sistemas en red contemplan estos casos. Para ello, se utilizan señaladores, de tal manera que un dato puede estar conectado a varios de los que se encuentran en niveles superiores a él (figura 3.10).

Este tipo de sistemas es muy útil cuando las relaciones y los nexos de unión se pueden definir con anterioridad. La organización en red de los datos evita redundancias.

#### **III.4.3. Sistemas relacionales.**

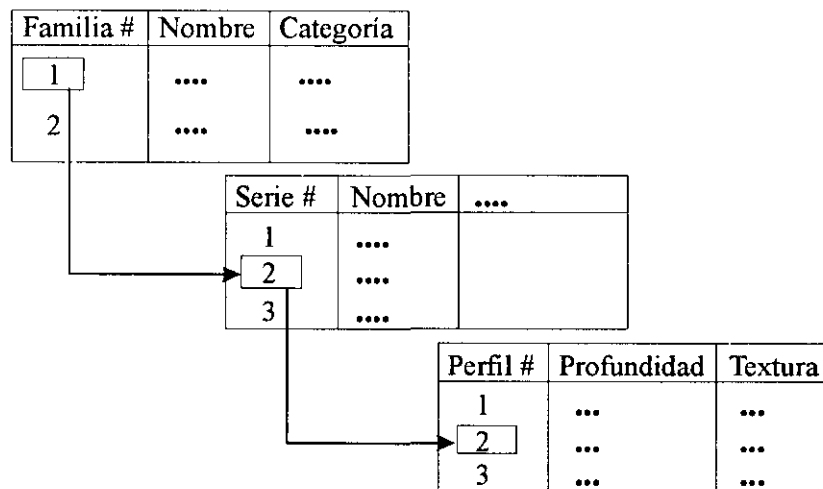
Es el modelo más simple y eficaz de estructura para almacenar las bases de datos. Los datos se almacenan en series de tablas conocidas como relaciones (figura 3.11).

Cada relación es un archivo bidimensional compuesto de filas o *tuples* y columnas o *atributos*. Se pueden manejar utilizando operadores matemáticos y lógica Booleana, creándose nuevas relaciones a partir de las ya existentes.



**Figura 3.10.** Estructura de Datos en Red para polígonos simples. (a) El mapa M (b) Los dos polígonos que lo componen I y II (c) Una estructura en red ligando todos los polígonos, líneas y puntos.

La ventaja de las bases de datos relacionales es la flexibilidad de su estructura y que todas las preguntas se pueden formular utilizando lógica Booleana. Permiten añadir, buscar, combinar y eliminar datos y/o tuples. La desventaja es que muchas operaciones implican una búsqueda secuencial hasta encontrar los datos que satisfacen la relación requerida.



**Figura 3.11.** Estructura de Base de Datos Relacional.

La facilidad de gestión de datos que proporciona esta estructura en comparación con los otros sistemas nos han conducido a considerar ésta como la más adecuada para almacenar nuestros datos. ILWIS de hecho utiliza esta estructura para el almacenamiento.

Las estructuras de bases de datos que se han presentado en los anteriores apartados son óptimas para el almacenamiento de atributos o información temática, pero carecen de versatilidad cuando se trata de datos gráficos (Aronson, 1985). Por ello, los datos gráficos se almacenan en un conjunto de ficheros de acceso directo, con la idea de obtener mejores resultados en su gestión.

### **III.5. Formatos de almacenamiento para la base de datos gráfica en un GIS.**

Los datos espaciales se pueden incorporar al GIS utilizando dos tipos de estructuras de almacenamiento diferentes: modo ráster y modo vector.

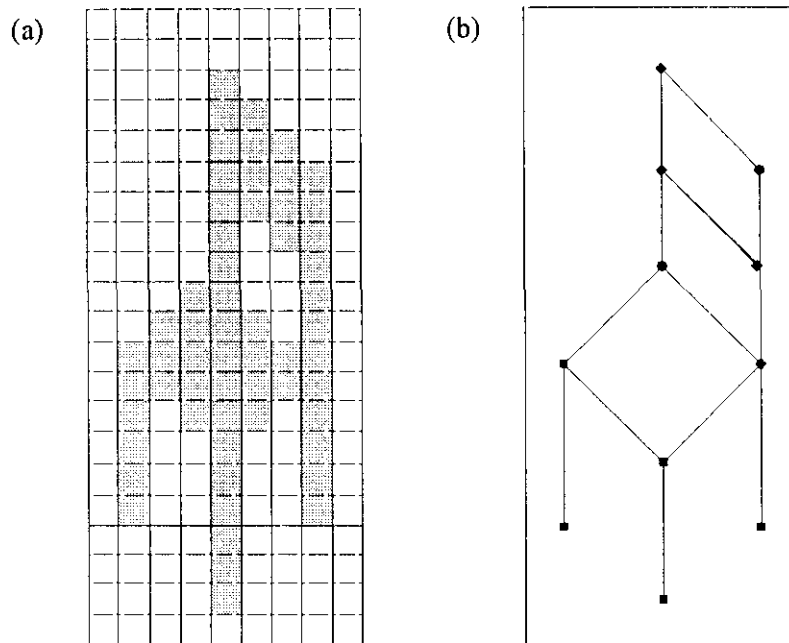
#### **III.5.1. Almacenamiento en modo ráster o en grid.**

Las estructuras ráster más sencillas consisten en una formación de celdas dispuestas en forma de red (llamadas **píxeles** o *picture elements*). En ellas, cada celda está referenciada por un número de línea y columna y contiene un valor que representa el atributo que se está cartografiando.

En las estructuras ráster un punto está representado por una celda, una línea por un número de celdas adyacentes que se disponen en una dirección determinada y un área por una aglomeración de celdas adyacentes (figura 3.12a). Este tipo de estructura de datos es fácil de manejar en el ordenador por la facilidad con la que series de líneas y columnas se pueden almacenar, manejar y desplegar.

Esta estructura implica que la superficie bidimensional sobre la que se representan los datos geográficos no es continua, sino discreta, lo que puede tener un efecto importante en la estimación de longitudes y áreas cuando los tamaños de celda son grandes con respecto a los objetos que representan.

El modelo ráster asume que el espacio geográfico se puede tratar como si fuera una superficie Cartesiana plana. Cada píxel o celda se asocia entonces con una parcela cuadrada de tierra. La resolución o escala de los datos ráster es por tanto la relación entre el tamaño de celda en la base de datos y el tamaño de la celda en la superficie.



**Figura 3.12.** Formatos de almacenamiento de datos gráficos en un GIS.

### III.5.2. Almacenamiento en modo vector.

El modelo vectorial de un objeto es un intento de representarlo tan exactamente como sea posible (figura 3.12b). El espacio de coordenadas se supone que es continuo, no discretizado, permitiendo que se puedan definir todas las posiciones, longitudes y dimensiones de forma precisa. De hecho, esto no es exactamente posible debido a las limitaciones que presentan los ordenadores y las pantallas.

Además de la suposición de coordenadas matemáticas exactas, los métodos vectoriales de almacenamiento de datos utilizan relaciones implícitas que permiten almacenar datos complejos en un mínimo de espacio.

### III.5.3. La elección entre ráster y vector.

Los modos ráster y vector representan enfoques claramente diferentes para la modelización de información geográfica pero ambos son métodos válidos para representarla, siendo además ambas estructuras interconvertibles.

Haralick (1980), Shapiro (1980) y Shapiro & Haralick (1980) demostraron que, al igual que para los atributos, es posible establecer una estructura relacional para los datos gráficos que sea capaz de manejar el modo vector y ráster de forma equivalente.

Los atributos que describen lo que representa una entidad pueden incorporar información sobre sus características y también sobre la forma en la que ésta se debe manejar en la base de datos o el tipo de relaciones que puede tener. Así pues, siendo el ráster y el vector estructuras de datos igualmente válidas para la representación espacial, lo que hay que decidir es cuál resulta más ventajosa según el tipo de análisis que se vaya a realizar (tabla 3.1).

**Tabla 3.1.** Comparación entre los métodos vectoriales y ráster (Burrough, 1986).

---

#### Métodos vectoriales

##### Ventajas

Buena representación de estructuras de datos fenomenológicos.

Estructura de datos compacta.

La topología puede describirse completamente con uniones de tipo red.

Gráficos precisos.

Posible recuperación, actualización y generalización de gráficos y atributos.

##### Desventajas

Estructuras de datos complejas.

Dificultades en la combinación de mapas de polígonos o de mapas de polígonos y ráster a través de superposición.

La simulación es difícil porque cada unidad tiene una forma topológica diferente.

El despliegue e impresión puede ser caro, particularmente para impresiones en alta calidad, en color y con tramas.

La tecnología es cara, particularmente para el software y hardware más sofisticado.

Es imposible el análisis espacial y filtrado entre polígonos.

---

**Tabla 3.1. (cont).** Comparación entre los métodos vectoriales y ráster (Burrough, 1986).

---

**Métodos ráster****Ventajas**

Estructuras de datos simples.

La superposición y combinación de datos cartográficos con datos de tipo ráster es fácil.

Es fácil llevar a cabo los distintos tipos de análisis espacial.

La simulación es fácil porque cada unidad espacial tiene el mismo tamaño y forma.

La tecnología es barata y está siendo fuertemente desarrollada.

**Desventajas**

Volumen importante de los datos gráficos.

El uso de celdas grandes para reducir el volumen de datos significa que puede haber una pérdida de información.

Los mapas ráster originales son considerablemente menos atractivos.

Las uniones en red son difíciles de establecer.

Las transformaciones de coordenadas llevan tiempo si no se dispone de algoritmos especialmente desarrollados.

---

La evaluación del riesgo es un proceso en el que se requiere combinar datos procedentes de muy diversas fuentes y realizar distintos tipos de operaciones de análisis espacial, por lo que es preferible el utilizar el modo ráster para llevar a cabo el almacenamiento de los datos gráficos.

**III.6. Análisis y transformación de datos en un GIS.**

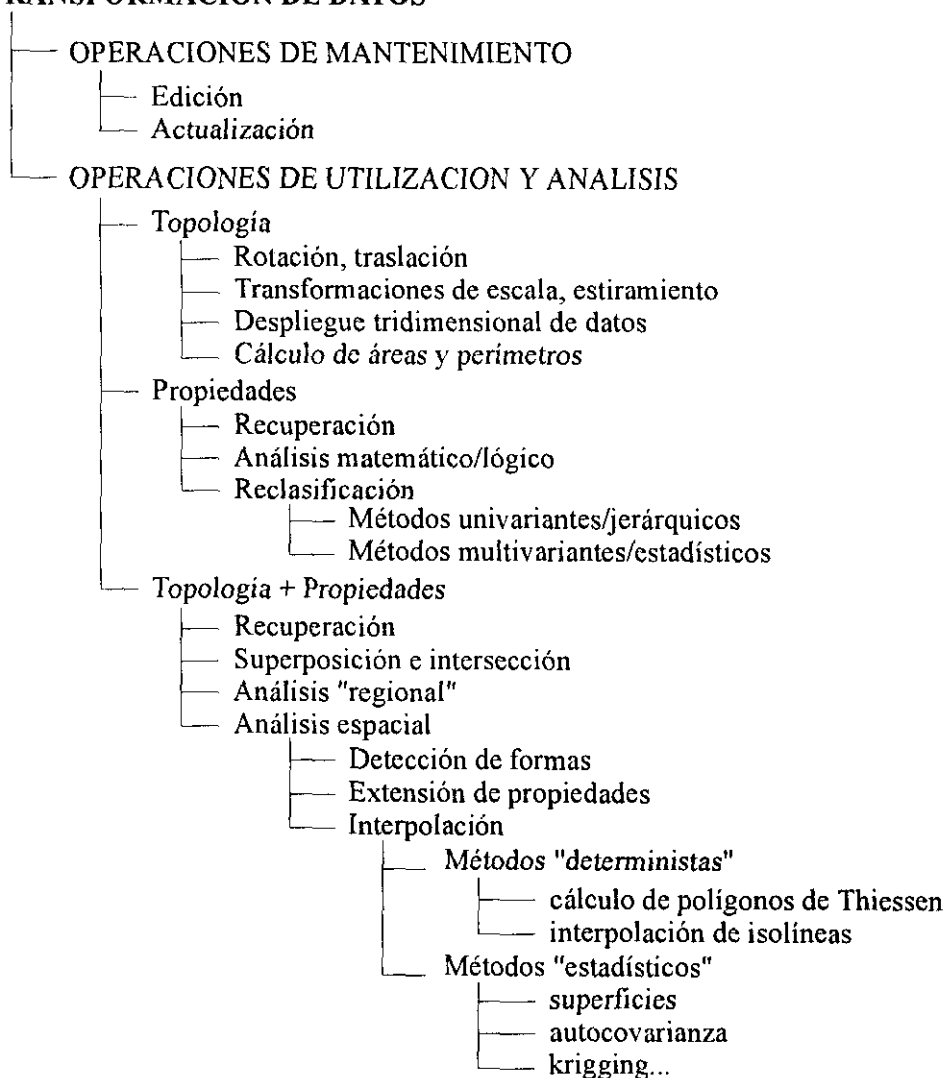
En comparación con otros tipos de sistemas de información, los GIS proporcionan un amplio abanico de herramientas de análisis que son capaces de operar sobre la topología o los aspectos espaciales de los datos geográficos, sobre los atributos no espaciales de éstos o sobre una combinación de ambos.

El software del GIS se ocupa de gestionar las relaciones existentes entre los ficheros gráficos y las bases de datos de atributos que se han almacenado por separado para que las operaciones de transformación sean posibles. El mecanismo de relación se basa en la utilización de identificadores únicos equivalentes para los elementos de la base de datos gráfica y las bases de datos que contienen los atributos de la misma.



En la figura 3.13 se muestra una simplificación de los principales tipos de herramientas que se utilizan para el análisis y transformación de datos e información gráfica en los GIS. Estas herramientas comprenden desde métodos simples de extracción de la información existente en las bases de datos a análisis espaciales utilizando métodos de interpolación y funciones complejas, pasando por métodos uni y multivariantes de análisis estadístico.

### TRANSFORMACION DE DATOS



**Figura 3.13.** Representación esquemática de la jerarquía de operaciones de transformación de datos que presentan los Sistemas de Información Geográfica (Burrough, 1986).

Para realizar una operación de análisis o transformación se necesita establecer el nexo de conexión entre las bases de datos de origen y la salida que proporcionará la respuesta solicitada. Este nexo está representado por cualquier función que se pueda utilizar para transformar los datos de uno o más mapas de entrada en uno de salida.

El análisis de datos se realiza cuando hay que solucionar un problema o pregunta determinada que los usuarios del GIS se plantean. Las bases de datos contienen información en forma de "mapas", que se pueden utilizar para responder a esta necesidad.

Los "mapas" que componen la base de datos geográfica representan variables o propiedades de una zona que se pueden expresar por medio de escalas de tipo cuantitativo o cualitativo (p.e. pH, composición química, litología, precipitaciones...). En cada mapa, todos los puntos (entendidos como pares de coordenadas X,Y) en los que el valor de la variable sea el mismo, se agrupan formando regiones diferenciadas entre sí (ej. unidades litológicas).

Hay tres grupos principales de funciones de transformación que se pueden utilizar para obtener un mapa de salida a partir de uno o más de entrada.

El primer grupo de funciones opera sobre los valores que las variables tienen en cada punto, sin tener en cuenta los de sus alrededores. La forma más simple de "*transformación puntual*" está representada por los operadores matemáticos (suma, resta,...), estadísticos o Booleanos.

El segundo grupo de funciones tiene en cuenta las propiedades de la región a la que pertenece el punto sobre el que se aplican. Por ejemplo, a partir de un mapa que incluya los límites administrativos y otro con la localización de colegios, podemos crear uno nuevo en el que cada área administrativa se recodifique de acuerdo con el número de colegios que caen dentro de sus límites.

El tercer grupo de funciones relaciona a cada punto del mapa con sus vecinos. Todas las funciones de este tipo hacen uso explícito de algún tipo de asociaciones espaciales para determinar el valor que tendrá cada punto en el nuevo mapa. Algunas funciones típicas son las que calculan la media ponderada, máximos, mínimos, etc. de una zona determinada alrededor de cada punto y asignan el resultado obtenido al valor del punto en el nuevo mapa.

Para llevar a cabo el análisis de problemas complejos, representativos de diversas áreas geográficas (por ej. estudio del riesgo de erosión, de la capacidad agrícola de los suelos, etc.), es común la aplicación repetitiva de un número elevado de funciones de transformación de datos de distinto tipo o categoría.

En estos casos, puede ser útil en muchas ocasiones la unión en una sola secuencia de todas las operaciones de análisis implicadas en el cálculo (*automatización*). El proceso en el que se establece esta secuencia se denomina **modelización cartográfica** y a la secuencia se le llama **modelo cartográfico**.

La modelización cartográfica es una metodología de proceso de datos geográficos cuyo propósito se dirige a la obtención de aplicaciones claras y coherentes (Tomlin, 1991). Se basa en el concepto de que, cuando se trata de hallar la solución a un problema complejo, se hace necesario seguir una serie de pasos lógicos:

1. Determinar los datos que son necesarios para obtener la respuesta al problema.
2. Establecer, utilizando procedimientos lógicos, la forma en la que se debe proceder para obtener la respuesta a partir de los datos. Este proceso tiene como resultado la elaboración de un **diagrama de flujo o modelo lógico de datos** que indicará claramente los pasos a seguir en el trabajo.
3. Traducir al lenguaje del sistema que se esté utilizando el modelo de datos.
4. Implementar en el Sistema de Información Geográfica el resultado de esta traducción.

La principal ventaja que ofrece la modelización cartográfica en un GIS frente a los métodos convencionales de trabajo es la necesidad de definir claramente el problema y decidir los datos que se necesitan para solucionarlo (Burrough, 1986).

La necesidad de desarrollar un modelo de datos claro, lógico y que utilice operaciones de análisis espacial bien definidas que se puedan relacionar entre ellas fuerza al usuario a pensar claramente en los pasos que se deben seguir para solucionar el problema y a hacer su metodología abierta a examen y revisión.

Por último, la facilidad con la que se pueden comparar diversas opciones o escenarios una vez que el modelo se ha implementado abre la posibilidad de hacer ensayos (análisis de tipo *What if?*). Estas características convierten a la modelización cartográfica en el método más adecuado a seguir para diseñar la metodología para la evaluación del riesgo.

Existen dos tipos de preguntas principales a las que se puede responder utilizando las técnicas de modelización cartográfica: las de tipo "qué es o podría ser" y las que investigan "lo que debería ser". La respuesta a estas preguntas genera, respectivamente, modelos de tipo descriptivo y prescriptivo.

En los modelos de tipo descriptivo se puede distinguir a su vez entre aquellos que se ocupan de analizar datos cartográficos y los que se dedican a sintetizarlos. Los *modelos descriptivos analíticos* se relacionan generalmente con el desarrollo de aplicaciones orientadas a la adquisición de conocimientos objetivos, descomponiendo los datos de partida en niveles de mayor discriminación. Un ejemplo de un modelo de este tipo es el que intenta analizar el tiempo necesario para acceder a una posición determinada a partir de datos que nos proporcionen información sobre las características del terreno y la red de comunicaciones.

Por el contrario, los *modelos descriptivos sintéticos* recomponen los datos de partida para utilizarlos en un contexto particular y suelen asociarse con aplicaciones que implican la utilización de juicios subjetivos. Generalmente, los modelos de este tipo combinan los datos que representan los factores de los que depende una cuestión o decisión utilizando criterios que especifican la importancia relativa de cada uno de ellos. Un modelo típico con estas características es el que intenta determinar las áreas con mayor riesgo de erosión a partir de una serie de variables que se consideran claves para el cálculo. Estos modelos son los que mejor se ajustan al tipo de problema que tenemos que abordar en nuestro caso.

Los *modelos prescriptivos* están relacionados con procesos de toma de decisiones y de solución de problemas. Estos modelos se asocian generalmente con la solución de cuestiones en las que se requiere obtener información sobre los lugares o zonas que satisfacen unos criterios establecidos como, por ejemplo, la localización del mejor emplazamiento para una central nuclear. El trabajo con estos modelos implica el seguimiento de un proceso en tres fases que se identifican con el planteamiento, generación y evaluación de alternativas.

#### **IV. Diseño de la Metodología**

## IV. DISEÑO DE LA METODOLOGIA

La ecuación de la UNESCO, utilizada reiteradamente para la evaluación del riesgo volcánico, identifica claramente los tres factores principales de los que depende el riesgo (peligro, vulnerabilidad y valor), lo que debería permitir su aplicación, al menos de forma cualitativa, a cualquier zona volcánica.

Sin embargo, las limitaciones que a menudo han presentado las metodologías diseñadas para este propósito, han hecho necesario un método que: (1) pueda aprovechar los escasos datos disponibles en muchas áreas volcánicas teniendo en cuenta el contexto espacial en el que se distribuyen los fenómenos y (2) proporcione un marco dinámico para el estudio del riesgo permitiendo la generación reiterada de escenarios.

Para alcanzar el cumplimiento de estos objetivos, hemos planteado el diseño de una metodología basada en la utilización de las herramientas disponibles en los Sistemas de Información Geográfica, la cual presentamos a lo largo de este capítulo.

La evaluación del riesgo volcánico constituye un problema complejo que requiere la realización de un número elevado de cálculos encadenados. Para llevar a cabo este proceso en el marco de un Sistema de Información Geográfica, hemos recurrido a la aplicación de las técnicas de *modelización cartográfica*, presentadas en el capítulo anterior.

La aplicación de estas técnicas nos ha permitido diseñar un *modelo descriptivo sintético* capaz de simular los efectos producidos en el área afectada por cierto fenómeno a partir de las variables que intervienen en el cálculo, teniendo en cuenta la importancia relativa de cada una de ellas y los *procedimientos mediante los que se interrelacionan*. Este modelo sintetiza y representa la metodología que vamos a seguir en la evaluación del riesgo.

La formulación del modelo se ha llevado a cabo aplicando *procedimientos deductivos*, puesto que se trata de buscar la solución al problema descomponiéndolo jerárquicamente en una serie de componentes que, en última instancia, han determinado los datos y operaciones a partir de los cuales se pueden obtener los resultados que se esperan (Tomlin, 1991).

En el GIS, los datos que intervienen en el cálculo se identifican con *coberturas* o bases de datos, mientras que las operaciones se llevan a cabo haciendo uso del álgebra disponible y el apoyo de programas externos de simulación cuando las operaciones implican la realización de cálculos de elevada complejidad.

De acuerdo con el procedimiento de trabajo utilizado en modelización cartográfica, hemos llevado a cabo la formulación del modelo siguiendo una serie de pasos lógicos.

Como punto de partida, hemos establecido los criterios que debe satisfacer la metodología para que sea operativa y hemos elaborado un *modelo conceptual de datos* en el que se han representado las "*variables de riesgo*" que acotan, en conjunto, las propiedades más relevantes de las que depende el riesgo volcánico y la cadena lógica de procesos que, utilizando estas variables, se debe llevar a cabo para evaluar el riesgo.

El modelo conceptual nos ha servido de base para llevar a cabo la formulación del *modelo cartográfico*, en el que se expresa la metodología de trabajo por medio del análisis de las bases de datos que van a formar parte de la estructura de cálculo del riesgo y el tipo de operaciones que deberán tener lugar entre ellas.

#### IV.1. Criterios de diseño de la metodología.

Antes de llevar a cabo el diseño de la metodología, resulta fundamental establecer el conjunto de condiciones que debe satisfacer para que sea capaz de superar los obstáculos típicos con los que se ha encontrado la evaluación del riesgo tradicionalmente (vease apartado I.3), sin que ello vaya en detrimento de la fiabilidad o precisión de los resultados que se obtengan de su aplicación.

La primera condición que debe cumplir la metodología es que en ella intervengan de forma simple, pero fiable, los parámetros (*variables*) más significativos que participan en el riesgo, tanto en lo que se refiere al análisis del tipo de erupción probable, localización preferente del centro eruptivo y condiciones de dispersión de sus productos, como en lo que respecta al análisis de la zona de influencia de los fenómenos y de sus efectos sobre el medio físico y socioeconómico.

Las "variables de riesgo" que seleccionemos deben ser fáciles de adquirir o producir a partir de otros datos existentes y deben tener en cuenta el *contexto espacial* en el que tiene lugar el desarrollo de todos los procesos relacionados con el riesgo para que sea posible su integración en el GIS.

La metodología que diseñemos debe ser independiente, dentro de ciertos límites, de la escala de trabajo, siendo válida para la realización tanto de estudios regionales como locales. La escala a la que se realice el análisis del riesgo dependerá exclusivamente de las características de los datos utilizados para la obtención de las variables de riesgo, pero no deberá afectar ni a las variables ni a los procesos que intervienen en el cálculo.

La metodología, además, tendrá que ser lo bastante flexible y abierta como para permitir la introducción en el cálculo de datos hipotéticos, la sustitución de una o más variables por otras equivalentes y la actualización de los datos si se producen cambios en el conocimiento o condiciones de cualquiera de las variables que utiliza.

Por otra parte, el elevado número de operaciones de diverso tipo que implica la evaluación del riesgo, no debe suponer un obstáculo para la obtención rápida de resultados. Especialmente si pretendemos aplicar la metodología a crisis reales, debe ser lo bastante dinámica como para permitir la generación reiterada de escenarios que proporcionen respuesta a preguntas de tipo "*What if?*" (¿qué ocurriría si...?).

Para cumplir este criterio, debemos aplicar un conjunto de condicionantes al diseño de aquellos modelos que tengamos que implementar de forma externa al GIS, que básicamente se resumen en: (1) utilización efectiva de un número mínimo de variables en los procesos de cálculo a que estén destinados, (2) compatibilidad absoluta en la entrada y salida de datos con el GIS y (3) producción rápida de resultados.

Por último, puesto que el objetivo final de la metodología es el de evaluar los elementos afectados como consecuencia de que se produzca un evento de determinadas características, la presentación de los resultados adquiere gran relevancia. Deberemos por tanto reflejar, de la forma más simple y clara posible, el rango y extensión de los productos de la erupción y los efectos derivados de su interacción con los elementos bajo riesgo considerados.



## IV.2. Elaboración del modelo conceptual de datos.

Tomando como punto de partida los criterios establecidos en el apartado precedente, hemos procedido a identificar aquellas variables más significativas que intervienen en la evaluación del riesgo volcánico y hemos analizado el proceso lógico mediante el cual se deben relacionar y encadenar las operaciones entre ellas para alcanzar nuestro objetivo.

Los resultados de este análisis se han expresado gráficamente haciendo uso de un modelo conceptual de datos (figura 4.1), donde hemos reflejado las variables,- agrupadas de acuerdo con el papel que representan en la evaluación del riesgo -, los procesos en que participan y los resultados que se obtienen. Este modelo nos ha servido de base para la posterior formulación del modelo cartográfico.

### IV.2.1. Identificación de las variables de riesgo.

Como hemos presentado en el capítulo dedicado a revisar los antecedentes, los estudios de riesgo volcánico se han articulado tradicionalmente en torno al análisis individual e independiente de cada uno de los factores identificados por la ecuación de la UNESCO.

La *peligrosidad volcánica* es, sin duda, el factor más difícil de acotar debido al elevado número de parámetros que intervienen en su comportamiento. Los estudios de peligrosidad se han basado usualmente en la hipótesis de que las distintas áreas de un volcán se verán afectadas en el futuro por el mismo tipo de eventos que tuvieron lugar en esa zona en el pasado, con una frecuencia media igual a la que presentaron entonces (Tilling ed., 1989).

Por ello, los estudios de peligrosidad se han centrado en el análisis del comportamiento que los volcanes han tenido en el pasado, a través del estudio de los eventos documentados en el registro histórico y geológico.

En este tipo de estudios se han analizado principalmente dos variables que se proyectan al futuro: la naturaleza de las erupciones y la probabilidad de erupción. La primera determina la escala o magnitud de la erupción, su estilo y el tipo de fenómenos volcánicos (*factores de riesgo*) asociados y la segunda mide la periodicidad de los eventos en función de su magnitud.

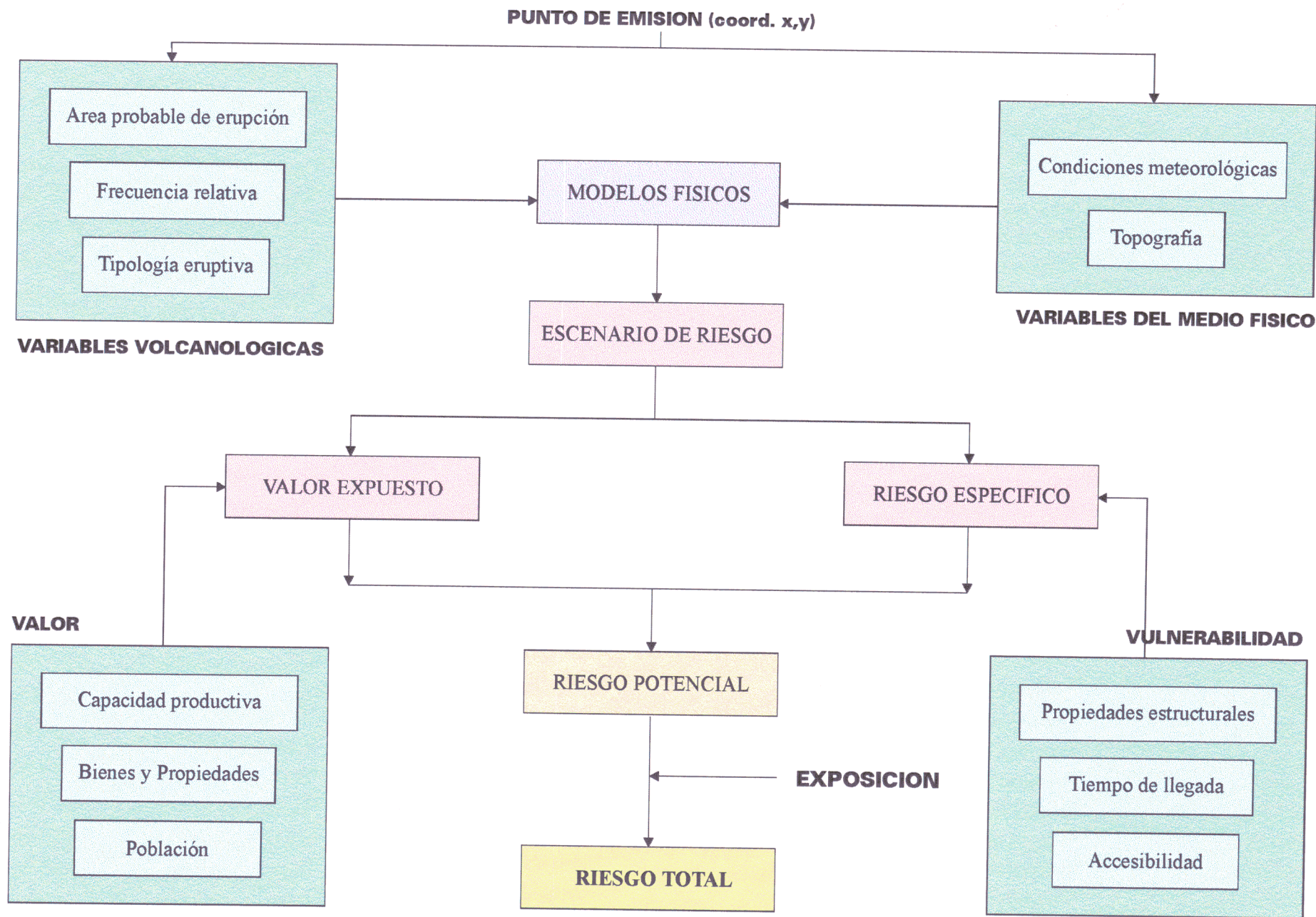


Figura 4.1. Modelo conceptual de datos.

La probabilidad de erupción es una variable difícil de estimar utilizando métodos de cálculo cuantitativos, puesto que éstos se basan en la identificación de un patrón estadístico que describa la distribución temporal de erupciones. Para ello, se requiere un registro histórico y geológico amplio y bien documentado que permita obtener una muestra representativa de todos los tipos de actividad posibles en el volcán objeto de estudio.

A este problema se añade que, para que los períodos de retorno que se establezcan para un volcán sean correctos, la probabilidad debe obtenerse de forma independiente para cada una de las escalas de magnitud identificadas, - bajo las que quedarán agrupadas todas aquellas erupciones de similares características -, lo que limita aún más la fiabilidad de los resultados.

Sin embargo, aunque las condiciones óptimas para calcular cuantitativamente la probabilidad no se presentan en la mayoría de los volcanes, es posible al menos obtener una estimación cualitativa de la misma si analizamos, de acuerdo con la idea de Tilling (1989), la **frecuencia relativa** con la que se han producido en un intervalo de tiempo determinado cada uno de los distintos tipos de eventos que se presentan en la zona de estudio.

Para obtener esta variable deberemos sin embargo haber clasificado antes los eventos del registro histórico y geológico según su tipología. Crandell et al. (1984), Tilling (1989) y otros autores han identificado un número elevado de parámetros que consideran necesario estudiar para establecer la naturaleza de las erupciones que han tenido lugar en un volcán determinado.

El primer problema que surge al aplicar estos métodos se plantea durante la recopilación de los parámetros necesarios para definir el comportamiento eruptivo, ya que generalmente es difícil obtenerlos todos e, incluso en el mejor de los casos, no proporcionan datos lo bastante detallados como para estimar la magnitud desde un punto de vista cuantitativo.

Puesto que la utilización de estos métodos complejos y sofisticados para clasificar la naturaleza de las erupciones no evita que ésta se exprese finalmente de forma cualitativa, hemos preferido seleccionar un método simple de clasificación como el que utilizan Westercamp (1984), Miller (1989) y otros, que se basa en la agrupación de los eventos de acuerdo con los *estilos eruptivos* a que pertenecen y con el tipo de *fenómenos asociados*.

La clasificación de los eventos eruptivos del pasado siguiendo estos métodos, teniendo en cuenta el contexto espacial en el que sitúan, proporciona información sobre la distribución en las diversas áreas de la zona objeto de estudio de la **tipología eruptiva** y permite estimar la frecuencia relativa de ocurrencia de cada uno de ellos.

Cuando además la distribución de centros es lo bastante dispersa como para que no sea posible establecer por anticipado la localización precisa del futuro centro eruptivo, deberemos evaluar las áreas con mayor probabilidad de que se localicen erupciones, es decir, el **área probable de erupción**.

Las variables que hemos identificado acotan la naturaleza de los fenómenos que posiblemente tendrán lugar en el futuro en un área volcánica, su probabilidad de ocurrencia y sus áreas "*fuentes*" potenciales.

Sin embargo, la dispersión de los productos depende de los valores que tomen en el momento de la erupción una serie de variables del medio físico de las cuales, las más significativas, son la **topografía** y las **condiciones meteorológicas** (Araña & Ortiz, 1993). El control que cada una de ellas ejerce sobre la dispersión de los productos depende del tipo de fenómeno considerado.

En conjunto, estas variables que hemos seleccionado determinan las características que tendrá una erupción en un punto determinado y las condiciones existentes para la distribución de sus productos, por lo que su conocimiento hace posible la evaluación de la peligrosidad.

El **valor** es un factor que rara vez se ha integrado en los estudios de peligrosidad volcánica. Su análisis se ha abordado principalmente en estudios de tipo geográfico, en los que se han desarrollado índices para caracterizarlo que resultan de difícil aplicación en la realización de estudios de riesgo volcánico.

Por este motivo, cuando se ha abordado su análisis en los estudios de riesgo, las variables seleccionadas para representar el valor se han identificado directamente con los *elementos bajo riesgo*. Las variables elegidas varían de unos estudios a otros dependido de sus objetivos y la escala de trabajo a la que se ha llevado a cabo el análisis del riesgo.

Con el fin de que la metodología utilice un estándar de fácil aplicación, hemos seleccionado como variables para representar el valor los elementos bajo riesgo que identifica Fournier d'Albe (1979) en su definición del riesgo volcánico: **población, bienes y propiedades y capacidad productiva**.

En cuanto a la **vulnerabilidad**, depende en primer lugar de las **propiedades estructurales** de los elementos que se ven afectados por los productos de la erupción, las cuales condicionan su respuesta frente a la acción del fenómeno eruptivo al que se ven expuestos.

La vulnerabilidad de un elemento depende también de su posición relativa respecto al centro de erupción. En su formulación más simple, para la totalidad de un área potencialmente afectada por un fenómeno, la vulnerabilidad de los elementos de una misma clase variará de acuerdo con la distancia relativa al centro de emisión de cada uno de ellos.

Sin embargo, las leyes que gobiernan el desarrollo de los fenómenos volcánicos motivan que la distribución de sus productos no se realice, en general, de forma simultánea para todas aquellas áreas equidistantes al centro de emisión. Por este motivo, hemos considerado como variable más próxima a la realidad el tiempo que requieren los productos para alcanzar los elementos bajo riesgo situados en su área de influencia (**tiempo de llegada**).

La **accesibilidad** de los elementos bajo riesgo es la tercera variable que interviene en la estimación de la vulnerabilidad. La accesibilidad modifica la vulnerabilidad dependiendo de la proximidad entre elementos de un mismo tipo y de la facilidad de comunicación entre ellos.

Por último, existe una variable compleja que afecta tanto al valor como a la vulnerabilidad, la cual se denomina **exposición**. Esta variable representa las condiciones existentes en el momento en el que se produce la erupción.

La exposición tiene en cuenta el momento del día, época del año, condiciones meteorológicas, estado y condiciones de la vegetación, etc. y refleja las circunstancias precisas en las que se encuentran los elementos bajo riesgo en el momento de la erupción, influyendo de forma significativa sobre las pérdidas que se pueden producir como consecuencia del evento.

La exposición no se mantiene constante a lo largo de una crisis eruptiva, sino que evoluciona a lo largo de su desarrollo, haciéndose su cuantificación tanto más compleja cuanto mayor sea la duración de la crisis.

Independientemente de las variaciones que pueda experimentar la exposición a lo largo del desarrollo de la crisis, la vulnerabilidad y el valor son factores que evolucionan por sí mismos con el tiempo (por ej. cambian las características de la población, el tipo y número de infraestructuras...). Esta evolución puede representarse utilizando funciones económicas y sociales complejas que no hemos tenido en cuenta en este estudio.

#### **IV.2.2. Procedimiento lógico para el cálculo del riesgo.**

La evaluación interactiva del riesgo volcánico en el marco de un Sistema de Información Geográfica se basa en la posibilidad de: (1) simular los efectos derivados de que se produzca una erupción en un punto determinado del área de estudio y (2) valorar su incidencia sobre el medio.

Para que la simulación sea posible necesitamos conocer en primer lugar las coordenadas (x,y) del punto que se va a considerar como futuro centro de emisión y, en segundo lugar, las características más probables que presentará la erupción en ese punto (tanto en lo que se refiere a los fenómenos eruptivos más probables como a las condiciones para la dispersión de sus productos) y el grado de probabilidad de que allí se produzca una erupción en el futuro.

Las variables geológico-volcanológicas nos proporcionan la información necesaria sobre el fenómeno más probable, sus características y la probabilidad relativa de que se produzca una erupción de ese tipo tanto en el espacio como en el tiempo.

Las variables del medio físico (topografía y condiciones meteorológicas) nos informan por su parte sobre las condiciones existentes para la dispersión de los productos de la erupción a partir del punto seleccionado. Junto a las variables geológico-volcanológicas establecen las condiciones existentes para la dispersión de los productos de la erupción.

El análisis, a partir de estos datos, de la distribución potencial que alcanzarán los productos es una tarea compleja que se ha llevado a cabo tradicionalmente analizando la distribución de los depósitos de erupciones precedentes y extrapolando los resultados obtenidos a la situación que se podría dar en el futuro.

Con el desarrollo de los *modelos físicos de erupción*, los cuales se basan en la formulación de sistemas de ecuaciones que "reproducen" el comportamiento del fenómeno considerado, se ha abierto una vía para simular las erupciones y obtener así datos sobre el comportamiento de los fenómenos que representan.

Los modelos proporcionan una buena base para simular las áreas que potencialmente se verán afectadas por la ocurrencia de un fenómeno eruptivo determinado y, por este motivo, los hemos seleccionado como medio para establecer las áreas de influencia de los fenómenos eruptivos.

Puesto que el conjunto de variables de peligrosidad determinan respectivamente las características que tendrá una erupción en un punto determinado y las condiciones existentes para la distribución de sus productos, se pueden utilizar para alimentar los parámetros que los modelos requieren para su funcionamiento.

El proceso de simulación produce como resultado un *escenario de riesgo*, equivalente a lo que tradicionalmente se denomina *mapa de peligrosidad volcánica*, donde se refleja la distribución potencial de los productos expresada en términos probabilísticos.

A partir del escenario obtenido, para que sea posible valorar la incidencia que tiene sobre el medio, debemos estimar: (1) el *valor expuesto* de cada uno de los elementos bajo riesgo localizados en el área en la que se distribuyen los productos y (2) la *proporción de pérdidas* de estos elementos frente al fenómeno eruptivo considerado.

El *valor expuesto* depende de las características que presenten en la zona afectada por la simulación cada una de las variables socioeconómicas que intervienen en el cálculo y se expresa en los términos a que hace referencia cada una de ellas (por ej. número de habitantes, Km de infraestructuras, etc.).

La *proporción de pérdidas* o *riesgo específico* depende, por su parte, de la probabilidad de que una zona se vea afectada por los productos de la erupción y de la vulnerabilidad frente al fenómeno considerado de los elementos bajo riesgo presentes en esa zona.

La vulnerabilidad representa la probabilidad de pérdida de cada uno de los elementos bajo riesgo frente al fenómeno considerado y depende a su vez de la respuesta estructural de los elementos frente al fenómeno y de las condiciones externas que la modifican.

La combinación de los resultados obtenidos mediante el cálculo del valor expuesto y del riesgo específico, nos proporciona la estimación del *riesgo potencial*, entendido como la "*medida del valor que puede llegar a perderse o resultar afectado directa o indirectamente como consecuencia del evento considerado*".

Para obtener la evaluación del *riesgo total* asociado con un evento, es sin embargo necesario tener en cuenta el conjunto de variables relacionadas con la exposición. El análisis de la exposición nos permite determinar hasta qué punto el valor que representa el riesgo potencial corresponde a pérdidas reales, las cuales pueden ser inferiores o superiores a éste dependiendo de las circunstancias en que se produzca la erupción.

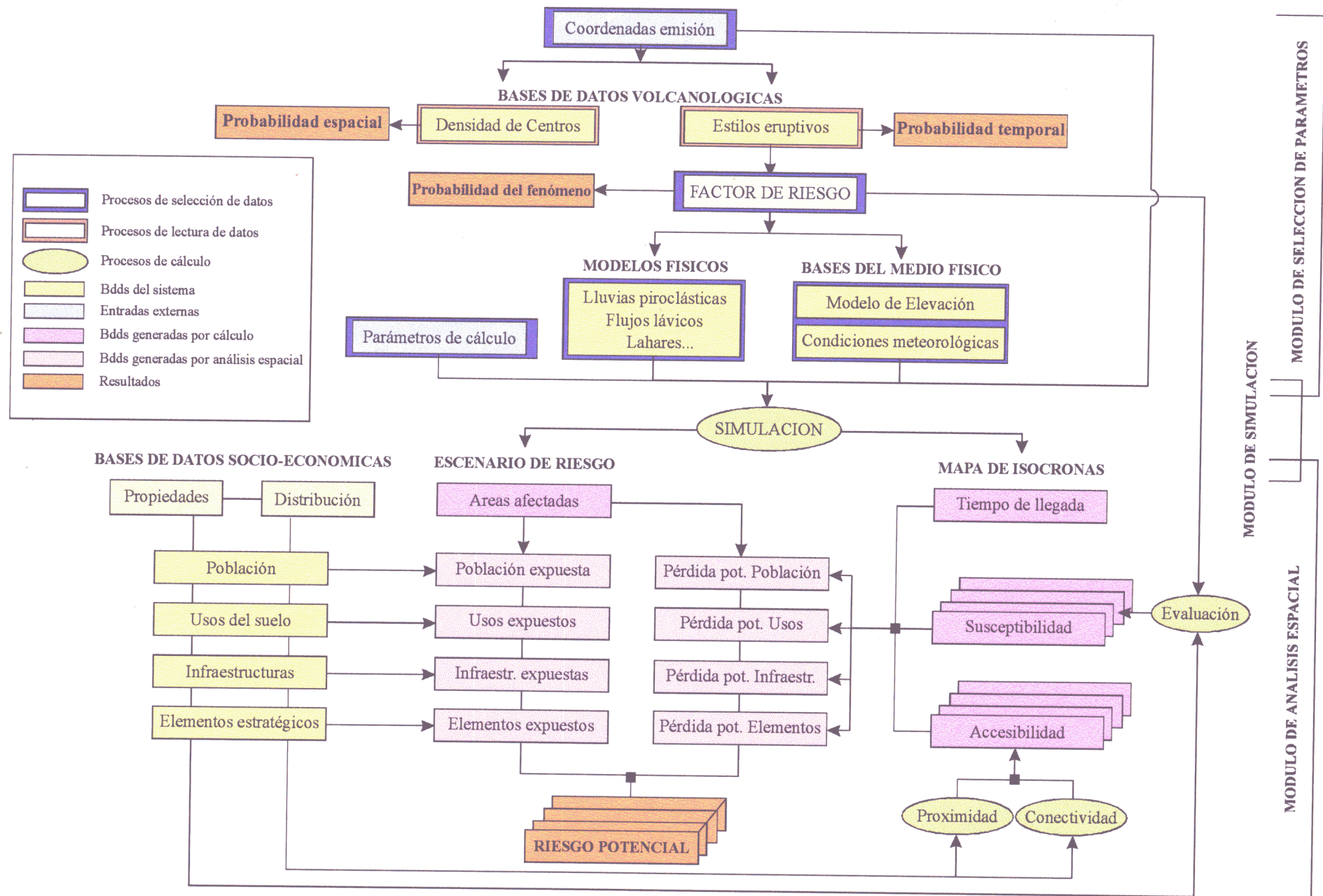
### IV.3. Formulación del modelo cartográfico.

Para que podamos llevar a cabo la formulación del modelo cartográfico, hemos de tener en cuenta las variables y procedimientos identificados en el apartado anterior y, a partir de ellos, seleccionar las bases de datos y especificar las operaciones que van a representarlos en el Sistema de Información Geográfica.

Las bases de datos que hemos seleccionado hacen referencia a *entidades* del medio físico, social o económico que podemos inventariar y que, al introducirlas en el GIS, proporcionan información sobre el estado de las variables.

El estudio del tipo de operaciones que debemos llevar a cabo entre las bases de datos para evaluar el riesgo nos ha permitido completar el diseño del modelo cartográfico, el cual se ha expresado gráficamente por medio de un *diagrama de flujo de datos* (figura 4.2).





**Figura 4.2.** Flujo de datos (modelo cartográfico) para la evaluación del riesgo en el marco de un GIS.

#### IV.3.1. Selección de las entidades de riesgo.

Siguiendo la estructura que hemos mantenido en el apartado anterior, las bases de datos o *entidades de riesgo* que hemos seleccionado para representar a las variables de riesgo identificadas se presentan a continuación en relación con cada una de ellas.

##### a) *Tipología eruptiva y frecuencia relativa.*

La clasificación de la naturaleza de los eventos eruptivos que han tenido lugar en el pasado en la zona de estudio, teniendo en cuenta el contexto espacial en el que se sitúan, proporciona la *distribución de estilos eruptivos*. El análisis de la frecuencia relativa con la que se han producido eventos pertenecientes a cada uno de los estilos, da una idea de su *probabilidad de ocurrencia* en el futuro.

Además, para cada estilo eruptivo identificado, el análisis de la frecuencia con la que se han producido los fenómenos asociados a cada uno de ellos proporciona información sobre la *probabilidad o frecuencia relativa de los factores de riesgo*.

##### b) *Area probable de erupción.*

Puesto que las zonas con mayor concentración de conos, fisuras y diques son consideradas como las que tienen una mayor debilidad cortical y, en consecuencia, mayor probabilidad de que se produzcan erupciones en el futuro, hemos seleccionado como entidad de riesgo para la identificación del área probable de erupción la *densidad* del conjunto de estos elementos.

##### c) *Topografía.*

La representación de la topografía en el marco de un GIS se puede hacer de tres formas: utilizando *Modelos de Elevación Digital (Digital Elevation Model, DEM)*, *Curvas de Nivel* o *Redes de Triangulación (Triangular Irregular Networks, TIN)*. La elección del método de representación se debe realizar teniendo en cuenta las características del GIS y los requerimientos de los modelos físicos que utilicemos.

d) *Condiciones meteorológicas.*

Las entidades que intervienen de forma más significativa en la dispersión de los productos de una erupción son la *dirección, velocidad y distribución en altura del viento*.

Sin embargo, y dependiendo de la complejidad del proceso de simulación llevado a cabo con el modelo físico, puede llegar a ser necesaria la consideración de otras entidades como *temperatura, humedad relativa del aire, presión, etc.*

e) *Población.*

La forma más sencilla de incorporar al GIS los aspectos que definen las características de la población es considerando su *distribución* y las *estadísticas de población para cada núcleo urbano*, las cuales deberían incluir como mínimo información sobre el número de habitantes, aunque es posible añadir otros índices que mejoren la estimación del valor, como renta per cápita, grupos de edad, etc.

f) *Bienes y propiedades.*

Las entidades que definen esta variable pertenecen a dos grupos, de los que el primero engloba a una serie de bases de datos que proporcionan información sobre la *distribución de infraestructuras*. En esta categoría se incluyen los recursos energéticos, el suministro de agua, la red de transportes y la de comunicaciones.

El segundo grupo de entidades proporciona información sobre: *estado y características de la vivienda y localización y características de elementos estratégicos* (hospitales, escuelas, parques de bomberos, ambulancias, etc.).

g) *Capacidad productiva.*

La capacidad productiva viene determinada por tres entidades básicas: la *industria*, la *agricultura* y las *estructuras recreativas* (usos del suelo).

h) *Propiedades estructurales de los elementos bajo riesgo.*

La forma de expresar la respuesta más probable que presentará cada una de las entidades que identifican el valor frente a la acción de los fenómenos eruptivos es evaluando la *susceptibilidad de los elementos bajo riesgo*, mediante el análisis de aquellas propiedades de los mismos que la condicionan.

i) *Tiempo de llegada.*

El método más adecuado para representar esta variable son los *mapas de isocronas*, los cuales permiten identificar las áreas a las que los productos de la erupción llegan simultáneamente.

La obtención de mapas que reflejen el tiempo de llegada de productos es posible aplicando modelos que consideren aquellos parámetros que influyen en la distribución temporal de los productos de la erupción.

j) *Accesibilidad.*

La accesibilidad depende básicamente de tres factores: proximidad o separación entre dos puntos, la relación a un sistema de comunicaciones que permita salvar la distancia entre ellos y, el "esfuerzo" (tiempo, coste...) requerido para salvarla.

Independientemente del índice seleccionado para el cálculo, la entidad que mejor representa el resultado es el *mapa de isoaccesibilidad*, el cual deberá siempre hacer referencia a los parámetros o formulación que se han utilizado para su generación.

La exposición es una variable difícil de cuantificar debido a que viene determinada por la interacción de una serie de entidades indicadoras de las condiciones del medio físico y socioeconómico en el momento de la erupción.

Por este motivo, no se han desarrollado hasta el momento índices que permitan simular estas condiciones y la evaluación del riesgo se limita a la estimación del riesgo potencial.

### IV.3.2. Operaciones necesarias para el cálculo del riesgo.

Para que el modelo cartográfico llegue a ser operativo, debemos expresar los procedimientos que en el modelo conceptual conectan a las variables de riesgo en términos de operaciones que indiquen la forma en la que se deben combinar las bases de datos para completar cada uno de los pasos que comprende el cálculo del riesgo.

En el procedimiento lógico que hemos establecido para llevar a cabo la evaluación del riesgo, se pueden distinguir tres procesos o pasos principales una vez seleccionado el centro de emisión a partir del que se desea realizar la simulación.

El primer proceso está dirigido a obtener información de dos tipos: las características potenciales que una erupción tendría en el punto seleccionado para el cálculo y la probabilidad relativa de que ésta tenga lugar en el futuro. Las bases de datos que participan en esta fase del cálculo son las que representan a las variables geológico-volcanológicas y del medio físico.

Para extraer ambos tipos de información, es necesario realizar una "selección" en cada una de las bases de datos que intervienen en el proceso, destinada a obtener el "valor" que cada una de ellas adopta en las coordenadas correspondientes al centro de emisión señalado. Esta operación es posible en el GIS debido a que las bases de datos contienen esta información en forma de "mapas" en los que todos los "puntos" que los componen están georreferenciados.

El segundo proceso utiliza los datos obtenidos como consecuencia de la selección para simular el área probable en la que se distribuirán los productos de la erupción. Las operaciones necesarias para obtener el escenario de riesgo se llevan a cabo aplicando los modelos físicos de erupción, los cuales, para mayor eficiencia se almacenan generalmente en programas independientes.

Por último, el tercer proceso utiliza los resultados de la simulación para analizar los efectos previsibles de la erupción. En esta fase, el escenario constituye una base de datos intermedia que participa, junto a las que representan el valor y la vulnerabilidad, en el proceso de estimación del riesgo.

El conjunto de operaciones necesarias para valorar los efectos de la simulación sobre el medio pertenecen a la categoría de *operaciones de análisis espacial*.

De todos los tipos posibles de operaciones de análisis espacial que se pueden llevar a cabo en el GIS (vease cap. III), son las de superposición e intersección de mapas las que van a permitir que establezcamos las relaciones necesarias entre las distintas bases de datos para llevar a cabo el cálculo.

El valor expuesto lo podemos obtener aplicando operadores lógicos de tipo IF THEN ELSE que nos permitan extraer los valores que toma cada uno de los elementos bajo riesgo en el área representada en el escenario. Este tipo de operadores pertenece a un grupo de operaciones a las que se hace referencia en general como *cruce de mapas*.

La obtención del riesgo específico requiere la aplicación de operadores matemáticos, ya que éste se expresa como el *producto* de la probabilidad de que un área se vea afectada por los productos de la erupción (escenario de riesgo) por la vulnerabilidad de los elementos a los cuales afectan.

El producto del valor expuesto por el riesgo específico conduce a su vez a la estimación del riesgo potencial. Si dispusiéramos de información sobre la exposición (expresada como un factor de incremento/decremento del riesgo potencial), el producto de ésta con el riesgo potencial nos permitiría estimar el riesgo total.

Como se desprende del análisis realizado, el conjunto de operaciones que son necesarias para completar cada uno de los procesos necesarios para el cálculo del riesgo podemos almacenarlas para su procesamiento en módulos independientes entre sí. Esta estructura proporciona una mayor velocidad de cálculo y un acceso más eficiente a las bases de datos.

Sin embargo, para que en este caso sea posible la comunicación y traspaso de datos entre los módulos, es necesario utilizar *interfases* entre ellos. La forma en la que podemos establecerlas es generando procedimientos de intercambio de datos que faciliten la entrada y salida de datos a y desde cada uno de los módulos que componen el modelo cartográfico.

## **IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGIA**





## CONDICIONES DE IMPLEMENTACION

Para completar el desarrollo de la metodología, debemos implementar el modelo cartográfico diseñado, lo que generalmente se lleva a cabo a través de la realización de un estudio piloto en un área de trabajo concreta.

El estudio piloto tiene como propósito aplicar la metodología diseñada a pequeña escala antes de extender su uso. El análisis de los resultados del estudio permite: (1) extraer conclusiones sobre el grado de utilidad del modelo cartográfico y el nivel de confianza que las variables y procedimientos utilizados en el cálculo proporcionan para la estimación del riesgo en el área de estudio y (2) estimar su potencial de aplicación en cualquier otra zona volcánica.

Como primer paso para implemetar el modelo cartográfico hemos seleccionado el área sobre la que se va a centrar el estudio piloto y analizado la situación en la que se encuentran los estudios de riesgo realizados en ella para así poder fijar los objetivos a alcanzar con la aplicación de la metodología. El carácter del estudio nos ha permitido asumir una serie de simplificaciones que han facilitado la implementación del modelo sin que ello haya influido de forma negativa sobre la validez de los resultados o la posterior aplicación general del modelo.

### *A) Selección del área de estudio.*

Para la realización del estudio piloto hemos seleccionado como área de trabajo la isla de Tenerife (Islas Canarias). Son tres las circunstancias que han motivado esta elección:

- a) La selección del Teide como Volcán de la Década y Volcán Laboratorio Europeo, con el consiguiente desarrollo de importantes investigaciones en la isla en el marco del **Proyecto Teide**, que ha servido de base para la realización de este estudio.
- b) El marco institucional favorable, señalado por el desarrollo progresivo de legislación en materia de Protección Civil y el interés de las Autoridades en la gestión efectiva del riesgo con vistas a la elaboración del Plan Especial para el Riesgo Volcánico.

- c) La localización en la isla de las dificultades típicas que se encuentran al evaluar el riesgo, lo que dificulta la aplicación de los métodos de análisis convencionales y la convierte en una plataforma inmejorable para comprobar que el modelo cumple los objetivos para los que ha sido diseñado. Básicamente, estas dificultades se relacionan con:
- (1) la imposibilidad de identificar un único punto preferente de erupción debido a la presencia de numerosos centros dispersos y a la coexistencia de una asociación espacio-temporal compleja de dos tipos de "*comportamientos*" volcánicos: el volcanismo asociado con un Sistema Central (Teide-Pico Viejo) y el asociado con alineaciones volcano-tectónicas regionales (Cordilleras Dorsales), que afecta al resto de la isla exceptuando quizá a los macizos basálticos antiguos.
  - (2) la escasez de datos que permitan clasificar, - siguiendo las escalas convencionales establecidas -, la naturaleza de las erupciones previsibles y su probabilidad. Las erupciones en tiempos históricos son escasas y no son representativas de todos los tipos de manifestaciones eruptivas presentes en la isla.

En el siguiente capítulo presentamos una revisión detallada de aquellas características de la isla cuyo conocimiento resulta relevante para analizar el riesgo volcánico.

### *B) Análisis de situación.*

En los estudios de riesgo abordados hasta la fecha en la isla se ha tendido a separar o "individualizar" el análisis del riesgo asociado al volcanismo central del que está asociado con las Dorsales.

Este procedimiento, necesario para que sea posible aplicar las metodologías de cálculo clásicas, resulta útil como primera aproximación al análisis del riesgo pero simplifica el problema en exceso, ya que no tiene en cuenta todo el rango de fenómenos que se pueden presentar en la isla, su compleja distribución espacial ni las posibles relaciones existentes entre ellos.

La metodología diseñada proporciona, en contraste con las clásicas, la posibilidad de llevar a cabo el estudio del riesgo desde tres perspectivas distintas: (1) el procedimiento clásico de trabajo, (2) la generación repetitiva de escenarios para comparar los efectos de que se produzcan erupciones en diversos puntos de la isla y (3) la predicción de la evolución de los fenómenos eruptivos en el caso de que se produzca una crisis.

La metodología, utilizada para el análisis del riesgo desde el punto de vista clásico, presenta como ventaja principal frente a las tradicionales la rapidez de cálculo y la facilidad de actualización de las bases de datos.

La generación de escenarios de riesgo proporciona información sobre los efectos que podría provocar una misma erupción si se produjese en distintas zonas de la isla y constituye una buena base para el análisis y tipificación de situaciones de crisis potencial, la determinación de emplazamientos "seguros" para los recursos de apoyo y el ensayo de planes de evacuación.

La predicción de la evolución de los fenómenos en situaciones de crisis sirve para obtener información "a tiempo real" sobre el posible desarrollo de una erupción concreta, lo que permite planificar de forma efectiva las medidas de emergencia. En este último caso es necesario disponer de datos detallados sobre el fenómeno para obtener la mayor precisión posible en los resultados del modelo.

Otra característica de los estudios realizados es la aplicación de enfoques de tipo determinista para estudiar el riesgo. Esto puede suponer una limitación al interpretar los resultados, ya que no se consideran una serie de circunstancias que pueden limitar la eficiencia del cálculo:

- 1) El riesgo puede tener su origen en la combinación de una serie de procesos acoplados o interrelacionados.
- 2) Puede haber procesos y elementos que intervienen en el cálculo pero que son lo bastante poco comprendidos o conocidos como para estar representados en el mismo.
- 3) Los cálculos necesarios para llevar a cabo el análisis pueden ser demasiado costosos o difíciles, lo que hace necesario en muchas ocasiones asumir simplificaciones.

- 4) La información sobre algunas de las variables requeridas puede no estar disponible.

Por estos motivos, la metodología diseñada considera el riesgo como una distribución de probabilidad. De esta forma se tiene en cuenta la incertidumbre inherente a las variables y la que se deriva de su utilización al aplicarlas para simular los fenómenos volcánicos.

La forma en la que se lleva a cabo el almacenamiento de los datos en el GIS es otro factor que apoya la utilización de un enfoque probabilístico en la evaluación del riesgo.

Independientemente del tipo de estructura seleccionada para el almacenamiento de datos (vectorial o ráster), su introducción en el marco del GIS supone la necesidad de llevar a cabo un muestreo del espacio continuo en el que se sitúan las variables, para representarlo de forma discreta (Maguire & Dangermond, 1991), lo que introduce una componente de incertidumbre en los cálculos derivados de la utilización de los mismos.

### *C) Objetivos del estudio piloto.*

De los tres tipos de aplicaciones que podemos desarrollar para llevar a cabo el estudio piloto del riesgo utilizando la metodología diseñada, es la generación de escenarios la que aborda de forma más completa los objetivos que nos hemos planteado en este estudio.

Tiene en cuenta en el análisis la componente espacial del riesgo, aplica un enfoque dinámico para su análisis y aporta un grado de innovación importante por la forma en la que plantea la evaluación. Por estas razones la hemos seleccionado para llevar a cabo el estudio piloto.

La implementación completa del modelo cartográfico en Tenerife supondría la incorporación al sistema de numerosas bases de datos, operaciones y modelos físicos para que la evaluación del riesgo fuese posible para cualquiera de los fenómenos volcánicos que pueden tener lugar en la isla, lo que está por encima de los objetivos que se persiguen con un estudio piloto.

Por ello, hemos centrado el análisis del riesgo en la comparación de los efectos que se pueden derivar del desarrollo de erupciones de tipo efusivo básico en aquellas áreas donde exista una mayor probabilidad de localización de las mismas.

Las razones que nos han conducido a centrar el estudio sobre este tipo de fenómenos son:

- a) El hecho de que el volcanismo histórico tanto en Tenerife como en el resto del archipiélago se pueda clasificar en mayor o menor medida dentro de esta pauta de comportamiento, lo que ha permitido a numerosos autores suponer que es éste el que tiene mayor probabilidad de ocurrencia en un futuro próximo.
- b) El que, salvo casos excepcionales, el desarrollo de este tipo de erupciones sigue unas pautas bien definidas en todo el archipiélago, que son fáciles de reproducir.
- c) El que los modelos físicos necesarios para simular los efectos de estas erupciones son simples, rápidos y están mejor calibrados que los que representan a otros fenómenos.
- d) El que la vulnerabilidad de los elementos bajo riesgo frente a estos fenómenos está bien definida y es más simple de estimar que en otros casos.

Esta simplificación se ha asumido para comprobar la eficiencia de la metodología diseñada y la corrección de los procedimientos de cálculo. Sin embargo, una vez comprobada su validez, podrán incorporarse las bases de datos y modelos necesarios para evaluar el riesgo procedente del resto de fenómenos presentes en la isla.

En segundo lugar, hemos considerado suficiente la realización de un estudio a nivel regional, por lo que la escala de trabajo idónea se sitúa en el rango comprendido entre el 1:100.000 y el 1:500.000.

El análisis a nivel regional ofrece un nivel de detalle ideal para comparar los efectos globales que el desarrollo de erupciones en distintos puntos de la isla tiene sobre el medio y, de hecho, es la escala que resulta más útil para analizar la forma en la que se deben coordinar los esfuerzos y distribuir los recursos entre el Gobierno Central y las Administraciones Locales. La escala regional es además la que generalmente se utiliza para la elaboración de planes integrados de gestión del territorio. El análisis del riesgo a nivel regional resulta útil también para distinguir aquellas áreas en las que resulta adecuado centrarse para la realización de estudios de detalle.

## **V. Características del Area de Estudio**

---

## V. CARACTERISTICAS DEL AREA DE ESTUDIO

La isla de Tenerife está situada en la mitad occidental del Archipiélago Canario, entre los paralelos 28°N y 28°35'N y los meridianos 16°8'E y 16°46'E, frente al NW del continente africano y a 370 Km de su costa (figura 5.1). Con sus 2.058 Km<sup>2</sup> de superficie, es la isla más extensa del Archipiélago. Su mayor altura es el Pico del Teide, que culmina a los 3.718 m sobre el nivel del mar.

El análisis del riesgo volcánico potencial en la isla requiere un conocimiento riguroso, no sólo de su encuadre geodinámico y geológico, sino también de las características geográficas y socioeconómicas de la misma. Por este motivo nos hemos centrado en el análisis de una serie de aspectos que hemos considerado clave para la correcta evaluación del riesgo y que nos han conducido a la caracterización de la realidad geológica, física y social de la isla.

### V.1. Marco geológico.

#### V.1.1. *Encuadre geodinámico del volcanismo canario.*

La caracterización del comportamiento eruptivo de un área volcánica activa constituye un elemento básico para analizar los riesgos asociados. La causa última de este comportamiento está íntimamente ligada al ambiente geodinámico de la región, por lo que su conocimiento es fundamental para determinar el origen y los mecanismos de formación de magmas.

Aquí seguiremos la síntesis más reciente publicada sobre estos aspectos (Araña, 1995), la cual resume otros trabajos donde se discuten las últimas teorías y se presenta y comenta la bibliografía existente al respecto (ej. Araña y Ortíz, 1986).

La mayor parte del Archipiélago Canario se encuentra situada en la zona de calma magnética del margen pasivo africano, por lo que se desconoce con exactitud la edad de la corteza bajo las islas. A la imprecisión que proporciona este hecho, se une la polémica que se ha venido desarrollando en las últimas décadas sobre la naturaleza de la corteza bajo las islas, la tectónica regional y los procesos que intervienen en la generación de magmas.

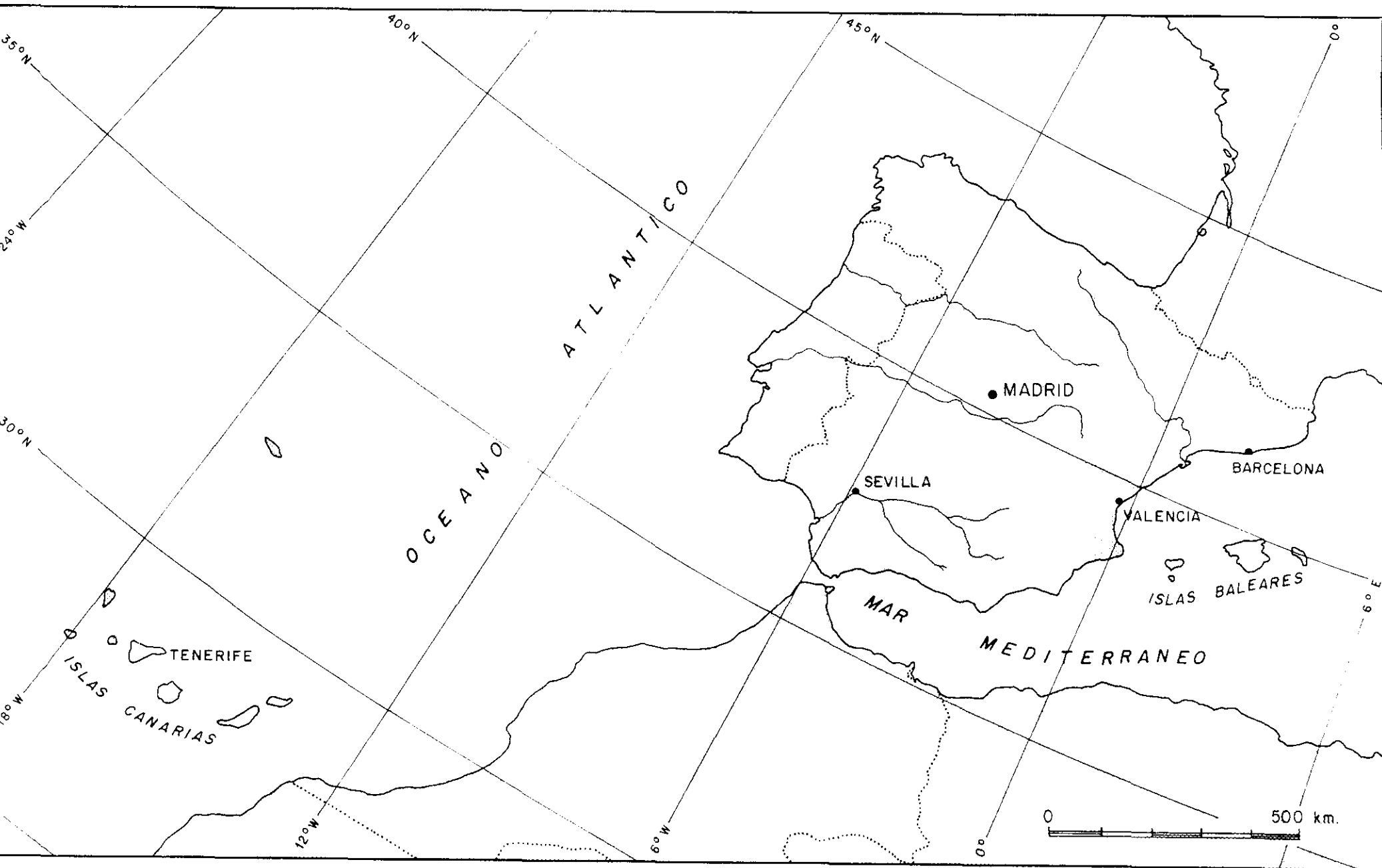


Figura 5.1. Localización del archipiélago Canario y la isla de Tenerife.



En cuanto a la caracterización de la corteza, tanto su profundidad como la del manto están peor definidas que bajo los fondos marinos próximos, aunque claramente pasa de tener unos 10 Km en el límite occidental del archipiélago a más de 20 Km en el oriental (en Araña, 1995). Parece evidente que, al menos bajo las Canarias orientales, existe un tipo de corteza "*transicional*" (entre oceánica y continental) que se extiende hasta el talud continental.

La idea más generalizada es que se trata de una corteza oceánica generada en el proto-Atlántico, durante un período de polaridad normal. Por ello, esta corteza coincide con casi toda la franja de calma magnética y es asimismo una zona de gran debilidad que ha experimentado una importante subsidencia (Araña & Ortiz, 1986).

Tanto el basamento de las islas como los edificios insulares están afectados por una red de fracturas (ver Coello, 1989) que los ha compartimentado en bloques. Estas fracturas se han detectado por procedimientos geofísicos, especialmente las de los fondos marinos interinsulares y las que afectan a los alrededores del archipiélago, o por procedimientos geológicos, cuando aparecen en superficie o en subsuelos profundos donde se han realizado sondeos. También pueden ser detectadas siguiendo métodos volcanológicos, a través de la observación de redes filonianas en los complejos basales y macizos antiguos o mediante el análisis de alineaciones de conos volcánicos en formaciones más modernas.

La red de fracturas que afecta al Archipiélago parece definida por dos sistemas principales. Uno de los sistemas ( $\sim$  E-W) podría estar asociado a la zona de fractura transcurrente Atlantis y tener una génesis por lo tanto relacionada con el proceso de expansión oceánica. El otro ( $\sim$  NE-SW), en el que se han detectado mecanismos de fallas inversas, estaría constituido por fracturas desarrolladas en el margen continental del NW africano, con el mismo rumbo que sus cuencas marginales, y reproduce las cicatrices hercínicas africanas a favor de las cuales se inició la apertura del Atlántico.

El análisis de los efectos que las fases sucesivas de apertura del Océano Atlántico han tenido sobre la evolución geodinámica de la zona constituye la base para establecer la relación entre la tectónica del área y la génesis y erupción de magmas. Araña y Ortiz (1986) reconocen tres etapas clave que han influido en el desarrollo de aspectos significativos del marco geodinámico canario:

- 1) La primera etapa, correspondiente con la formación de un proto-atlántico, se inició en el límite Triásico-Jurásico y culminó hace poco más de 150 Ma. A finales de esta etapa se formó la corteza sobre la que se asienta el Archipiélago. En cuanto al NW africano, cuenta ya con una plataforma carbonática perfectamente desarrollada en el Jurásico.
- 2) La segunda etapa abarca prácticamente la totalidad del Cretácico y se caracteriza por la deriva hacia el Este del continente africano, provocada por la definitiva apertura del Atlántico, cuyo ritmo de expansión alcanza los valores máximos en este período.

En el NW de Africa no parecen intervenir otros esfuerzos que los derivados de la subsidencia y colmatación de sus cuencas marginales, donde llegan a depositarse más de 10 Km de sedimentos. En consecuencia, se deforma su basamento, especialmente en el borde oceánico, donde una flexión pudo levantar una cresta paralela a la costa africana en la zona que posteriormente ocuparon las Canarias orientales.

- 3) La tercera y última etapa se puede hacer coincidir con todo el Terciario y su diferenciación se debe a la detección de un descenso en la velocidad de apertura del Atlántico (Larson & Pitman, 1972; Pitman & Talwani, 1972), que coincide con un cambio de dirección en el movimiento relativo entre Norteamérica y Africa (Sclater et al., 1977) debido a la colisión entre las placas africana y europea.

Los esfuerzos que se originan como resultado de este proceso dan lugar a un contexto geodinámico fuertemente compresivo en el NW de Africa, que afecta a la franja localizada aproximadamente entre Canarias, Cabo Verde y tierra firme.

La compresión generalizada en el NW de Africa induce al levantamiento de los bloques litosféricos que previamente habían sido individualizados por la conjunción de los sistemas de fracturas dominantes.

El levantamiento de los bloques insulares pudo comenzar en el Paleoceno, al frenarse la deriva de la placa y pudo alcanzar hasta 4-5 Km sobre el fondo oceánico. Paralelamente, la corteza afectada por este levantamiento pudo experimentar un acortamiento de cuarenta o más

kilómetros (Araña & Ortiz, 1986).

Este levantamiento provoca, bajo los bloques, una despresurización en zonas relativamente profundas del manto donde se induce una fusión parcial. Asimismo, la elevación de un bloque provoca un desequilibrio isostático regional que también puede compensarse disminuyendo la densidad mediante un proceso de fusión parcial en el manto.

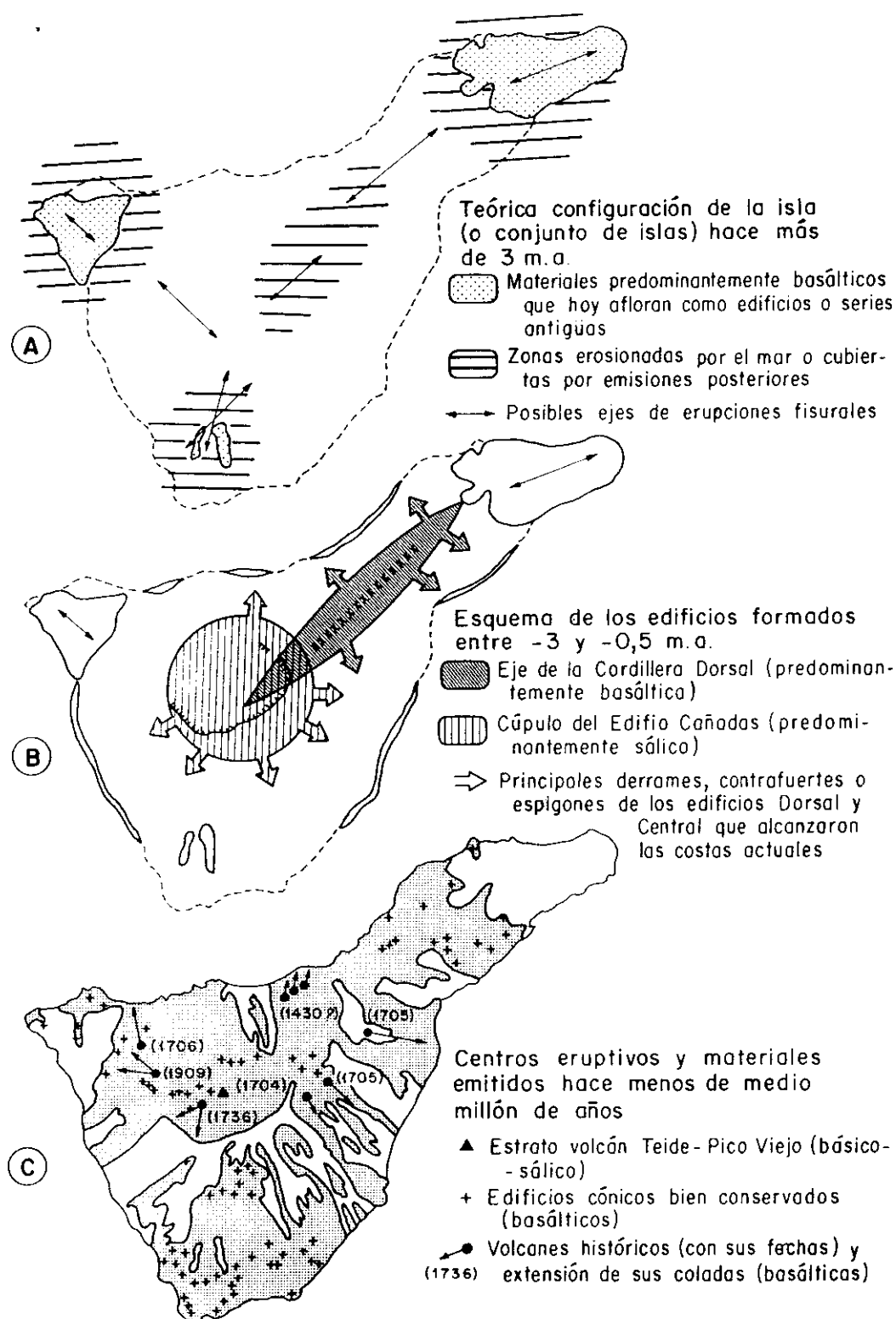
Cuando, esporádicamente, se invierte o atenúa la situación compresiva (que es la dominante) debido a alteraciones en la expansión oceánica, se desencadenan fases distensivas a favor de los principales sistemas de fracturas. La erupción de mayores volúmenes de magmas en Canarias se realiza en conexión con estas fases y las islas se van construyendo sobre los bloques litosféricos elevados o en proceso de levantamiento.

### **V.1.2. *Historia geológica de la isla de Tenerife.***

La edificación subaérea de Tenerife se inicia hace unos 7 Ma, prolongándose la actividad eruptiva, - prácticamente sin interrupción -, hasta nuestros días (erupción del Chinyero, 1909). Erupciones submarinas anteriores fueron acumulándose en el sustrato de la isla, conformando durante todo el Mioceno medio el basamento insular, que comenzó a surgir sobre el nivel del mar en la zona de Teno y en la base de Anaga (figura 5.2a).

En este primer ciclo, de intensa actividad de carácter fisural, se emiten grandes cantidades de basaltos muy fluidos que hoy afloran en Anaga, Teno y Adeje (Roque del Conde) en forma de potentes apilamientos de coladas. Los conjuntos están a su vez, profusamente intruidos por una red filoniana de diques, pitones y sills.

Se caracterizan estos edificios porque sus centros de emisión aparecen alineados siguiendo las directrices de grandes fracturas, lo que da lugar a que los productos volcánicos se hayan ido apilando en forma de tejado a dos aguas, cuya divisoria forma todavía la línea de cumbres. Este primer ciclo eruptivo culmina con unas emisiones sálicas que atraviesan los conjuntos basálticos en forma de complejos filonianos y dan lugar a domos sálicos que hoy en día conforman pitones, diques y planchas.



**Figura 5.2.** Evolución de la actividad volcánica en la isla de Tenerife (en Araña & Carracedo, 1978). (a) Teórica configuración de la isla (o conjunto de islas) hace más de 3 m.a.; (b) Esquema de los edificios formados entre -3 y -0,5 m.a. y (c) centros eruptivos y materiales emitidos hace menos de medio millón de años.

El mayor volumen de materiales se emitió en un lapso de tiempo relativamente corto (apenas un millón de años), gracias al mecanismo fisural dominante. El ciclo finaliza en Teno hace 5 Ma, continúa en Anaga hasta hace 3,5 Ma y se prolonga hasta los 2,45 Ma en la zona de Roque del Conde, por lo que en conjunto abarca hasta el Plioceno (Ancochea et al., 1990).

Terminado el primer episodio constructivo, se desarrolla en estas zonas otro destructivo en el que la erosión, la acción del mar y el fuerte encajamiento de una red torrencial modela los edificios, tallando un profundo relieve que en parte ha resultado fosilizado por los productos más recientes.

En la zona de Teno, durante esta fase comienza a formarse una rasa submarina de escasa profundidad, orlada por un enorme acantilado marino sólo rebajado en los puntos de evacuación de torrentes.

Desde hace aproximadamente 3 Ma, la mayor actividad volcánica se desplaza hacia las zonas centrales de la isla. Comienza desde estos momentos un ciclo muy complejo en el que alternan emisiones básicas y sálicas.

La máxima actividad corresponde, por una parte, al eje NE-SW, a lo largo del cual se construye la dorsal de Pedro Gil, con materiales basálticos y traquibasálticos y, por otra, se concentra en el cruce de las directrices NE-SW, NW-SE y NNE-SSW, donde se levanta el edificio central de la isla (Edificio Cañadas), con la emisión de gran cantidad de materiales sálicos. A lo largo de este segundo ciclo, Teno y Anaga sólo se ven afectados por erupciones esporádicas, de escaso volumen y localizadas en la periferia de los mismos (figura 5.2b).

El Edificio Cañadas representa el complejo volcánico construido en la zona central de Tenerife durante un periodo de tiempo que abarca desde más allá de los 3 Ma, - coincidiendo con el inicio del volcanismo fonolítico y traquítico (Fúster et al., 1968; Ancochea et al., 1990; Martí et al., 1994a) -, hasta la formación de la caldera de Las Cañadas, cuyo último episodio de formación ocurrió en su sector occidental hace aproximadamente 179 Ka (Martí et al., 1994c). Posiblemente el inicio de la actividad eruptiva fonolítica se solapase con los últimos estadios de la actividad basáltica fisural que construyó el escudo sobre el que se asienta el Edificio Cañadas (Martí et al., 1994a).

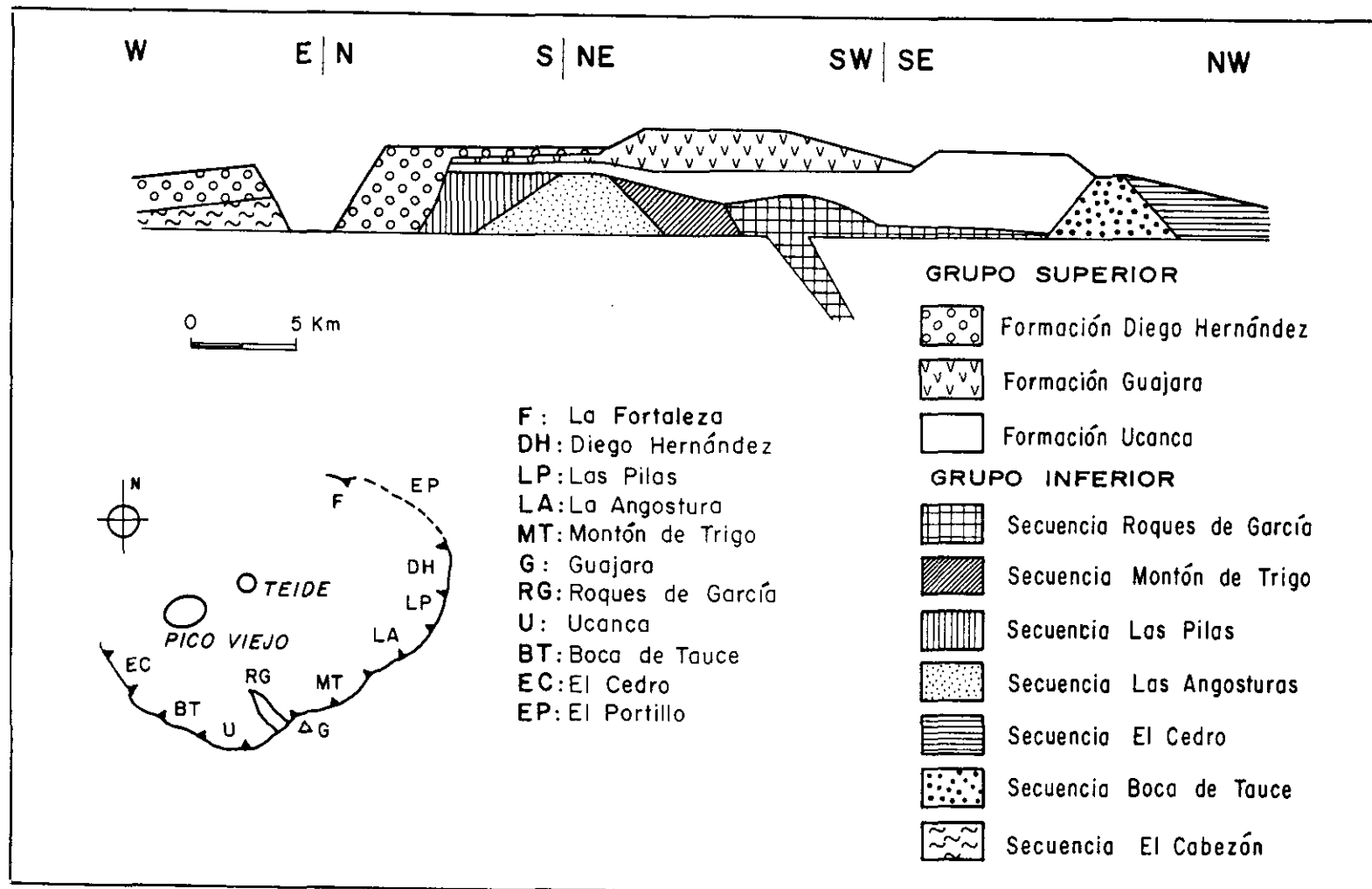
Actualmente, las vertientes sur de la isla de Tenerife y el macizo de Tigaiga al Norte son los restos que se conservan del Edificio Cañadas. Su reconstrucción morfológica sugiere que el edificio era alargado en la dirección NNE-SSW y que tenía menos de 3.000 m de altura (Araña, 1971). Estaba definido por conjuntos de bocas eruptivas dispuestas en paralelo a las directrices tectónicas regionales principales y próximas a la zona en la que se localiza la pared de la caldera.

El edificio ha sido estudiado desde diversos puntos de vista por numerosos autores (Fúster et al., 1968; Araña, 1971; Araña y Brändle, 1969; Ridley, 1970, 1971; Ancochea et al., 1990), que coinciden en la existencia de varios ciclos volcánicos durante su construcción.

Martí et al. (1994a) identifican dos grupos estratigráficos separados por una discontinuidad de primer orden. El Grupo Inferior tiene una edad que va de 3 a 2 Ma e incluye los productos de varios centros volcánicos que a su vez representan varios ciclos eruptivos. El Grupo Superior va desde los 1,57 hasta los 0,179 Ma e incluye tres formaciones diferentes (Ucanca, Guajara y Diego Hernández), representando cada una de ellas un ciclo eruptivo completo cuya duración varía entre 100 y 300 Ka. (figura 5.3). Los periodos de calma eruptiva que separan las formaciones tienen una duración de entre 120 a 150 Ka.

De acuerdo con estos autores, cada ciclo de actividad eruptiva representado por una formación en el Grupo Superior culminó con la formación de una caldera de colapso, afectando a distintos sectores del Edificio Cañadas. Así, y de acuerdo con los datos presentados por Martí et al. (1994a), la caldera de Las Cañadas no debe considerarse como el resultado de un evento único, sino como una caldera multicíclica cuya formación abarca un periodo de tiempo que va desde 1,18 a 0,179 Ma. En relación temporal con estas últimas etapas de generación de la caldera habría tenido lugar la formación de los valles de La Orotava y Güimar.

Uno de los aspectos principales señalados por Martí et al. (1994a) en la evolución de la parte superior del Edificio Cañadas,- corroborado por datos estratigráficos, geocronológicos y estructurales -, es la migración de SW a NE que presentan los centros emisores en función del tiempo. Esta variación espacial y temporal también ha sido descrita por otros autores (Araña, 1971; Alonso, 1989).



**Figura 5.3.** Representación esquemática de la estratigrafía de la pared de la Caldera de Las Cañadas (Martí et al, 1994a).

Durante todo este periodo, se mantiene la actividad en la zona correspondiente a la dorsal de Pedro Gil, si bien hay momentos en los que la actividad es mínima o nula en la parte más cercana a la zona central, debido a que los magmas basálticos que ascendían hacia la superficie interaccionaban con los magmas acumulados en cámaras superficiales, dando lugar en ocasiones a la erupción de magmas intermedios (Araña et al., 1994; Martí et al., 1994a).

Las emisiones en la zona de la dorsal se caracterizan por ser de tipo puntual, muchas de ellas alineadas, correspondiendo posiblemente con líneas de debilidad o de fractura en profundidad. Los materiales emitidos cubren los relieves pre-existentes y se superponen unos a otros en la vertical a lo largo del tiempo, por lo que cabe esperar que la estructura actualmente visible, - consistente en agrupaciones de conos de escorias con coladas lávicas asociadas -, se repita en profundidad.

Como consecuencia de la actividad persistente en esta zona hasta nuestros días, se produce el relleno de los barrancos de las zonas marginales situadas al Sur del macizo de Anaga. Algunos de éstos, como el del Valle de Las Mercedes, (cerrado a la altura de S. Cristobal de la Laguna), el de Hilario (cerrado en su confluencia con el de Los Puercos) o el de Tabares (cerrado por el gran cono de la Mña. de Guerra y por coladas posteriores) eran de grandes dimensiones.

Estos taponamientos han dado lugar a la acumulación de potentes masas complejas volcano-sedimentarias, quedando por último una pequeña laguna de tipo endorréico a cuya existencia en tiempos históricos debe su nombre la localidad de La Laguna.

En la zona Oeste de la isla y, desde hace aproximadamente 0,5 Ma (Abdel-Monem et al., 1972), comienza también la emisión de magmas basálticos y traquibasálticos con unas características similares a las presentadas en la Dorsal de Pedro Gil. También se localiza otra zona importante sobre la falda Sur del Edificio Cañadas. Los productos generados en este proceso ganan nuevo terreno al mar, configurando la topografía actual (figura 5.2c).

A lo largo de este periodo y, hasta la actualidad, se desarrolla en la depresión de Las Cañadas el complejo activo formado por el estratovolcán Teide-Pico Viejo, que representa el sistema volcánico más reciente de la isla.



Desde la última fase en la formación de la caldera, la depresión se ha rellenado parcialmente con los productos de una *suite* basanita-fonolita tefrítica-tefrita fonolítica-fonolita. La actividad intra-caldera ha sido particularmente persistente y, como resultado, se ha producido el crecimiento solapado de dos estratovolcanes: Teide (3.718 m) y Pico Viejo (3.250 m) en la zona norte de la caldera (Martí et al., 1994a). Las sucesivas fases constructivas de cada uno de los volcanes han culminado con eventos de formación de cráter.

Pico Viejo es un cono prácticamente simétrico cuya cima está ocupada por una caldera de paredes escarpadas. El Teide se alza desde la base de la caldera hasta su cima actual (El Pitón). El cono principal tiene una base aproximadamente circular con un diámetro de 5 a 5,5 Km. Su cima está truncada por una superficie inclinada hacia el norte, sobre la que se han construido tres conos sumitales sucesivamente más jóvenes, con sus correspondientes cráteres.

En relación con Pico Viejo existe un grupo de edificios adventicios entre los que destaca el de Roques Blancos por la extensión superficial de sus productos. Al menos 20 bocas adventicias se pueden asociar al Teide. Aparecen en altitudes comprendidas entre 2.000 y 2.600 m en los flancos Norte, Este y SE. Los más importantes son Pico Cabras, Montaña Blanca y Mña. Abejera.

Un grupo de centros eruptivos ha emitido potentes flujos de lava lobulares de composición traquítico-fonolítica y formado conos pumíticos estrombolianos dentro de la parte central de la caldera. En la zona oriental de la caldera aparecen también centros de emisión basálticos. Es de suponer que, durante el relleno de la caldera y coexistiendo con la formación del Teide-Pico Viejo, existieran otros aparatos activos, menores en tamaño y periodo eruptivo, que han quedado enterrados por los materiales de los centros de emisión visibles.

Por último, la historia volcanológica de Tenerife se completa con la localización de las erupciones de las que se tiene conocimiento histórico (tabla 5.1). Su distribución está en íntima relación con fracturas que han operado en momentos eruptivos anteriores, por lo que suelen disponerse en alineaciones y campos de volcanes más antiguos.

Todas ellas tienen marcado carácter fisural, algunas con concentración de la actividad en ciertos puntos de la fisura eruptiva. Por ej. en Arafo la actividad explosiva se dio

preferentemente en el sector central de la fisura, siendo de carácter efusivo en los extremos. En Chinyero, la actividad explosiva se concentró en los conos adventicios,- al extremo SE de la fisura -, y fue mixta en la zona más al NW. En Garachico, el sector NW se caracteriza por la emisión casi exclusiva de materiales lávicos y la actividad mixta se sitúa en el sector SE de la fisura. Sin embargo, Fasnía y Chahorra presentan características de volcanismo estrictamente fisural.

**Tabla 5.1.** Erupciones históricas en Tenerife.

Fecha	Nombre	Duración (días)
1430?	Taoro	7
31/12/1704	Siete Fuentes	13
5/01/1705	Fasnía	8
2/02/1705	Mña. Arenas o Arafo	24
5/05/1706	Mña. Negra o Garachico	9
9/06/1798	Chahorra o Narices del Teide	92
18/11/1909	Chinyero	10

Los datos de la erupción de Taoro proceden de las narraciones existentes entre los pueblos aborígenes. Otras erupciones históricas indicadas en diversos documentos, pero de fecha insegura son la del Teide de 1341 (relación de Recco), la de 1393 o 1399 (según referencias de marinos vizcaínos) y la de 1492 (que puede deducirse de la relación de Colón).

## **V.2. Marco físico.**

### **V.2.1. Climatología.**

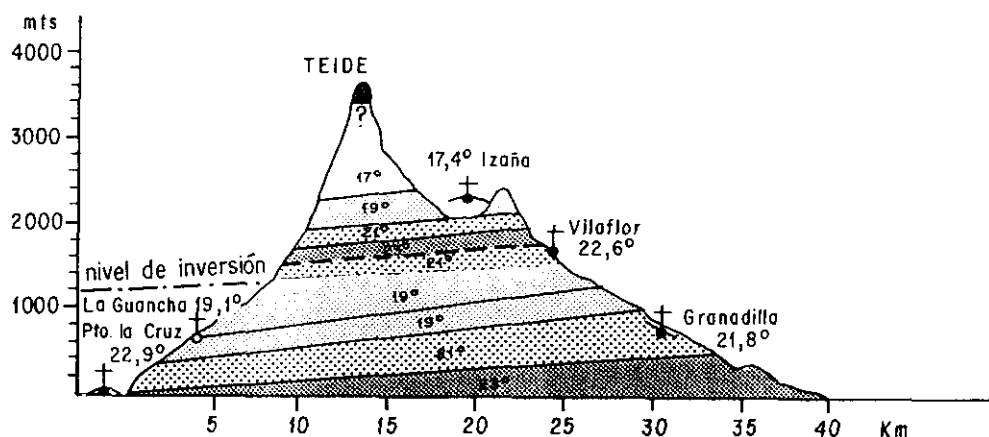
Las condiciones meteorológicas, principalmente el régimen de vientos y su distribución en altura influyen de forma determinante sobre el grado de dispersión de los productos de tipo piroclástico y en la difusión de los gases volcánicos. Por ello, resulta determinante conocer las características climáticas dominantes en el área de estudio a la hora de evaluar el riesgo.

La característica más significativa de la atmósfera en el archipiélago Canario es su notable estabilidad a todos los niveles. Existe una serie de factores que, por orden de magnitud, contribuyen a la definición del clima de Canarias:

a) El anticiclón de las Azores.

Emite sobre el archipiélago un flujo de vientos, denominados **alisios**, cuya característica fundamental es la estratificación anómala en la vertical en dos capas distintas: una inferior, - fresca y húmeda -, que puede alcanzar un espesor de hasta 1.500 m, y una superior bastante más seca.

La diferencia térmica entre ambas capas, entre otros factores, motiva la aparición de una **inversión en el gradiente térmico vertical**, que es tanto más acusada cuanto menor es la temperatura del aire inferior (figura 5.4).



**Figura 5.4.** Gradiente térmico vertical para las isotermas del mes de Agosto (en El País-Aguilar, 1993). Se observa la inversión en el gradiente a partir de los 1.200 m, dependiendo de la orientación de la ladera.

Otra diferencia entre ambas capas del alisio es la distinta dirección de los vientos (Marzol, 1990). En el nivel superficial dominan los vientos moderados de componente N-NE, mientras que en las capas superiores los vientos son fuertes y del W-NW.

Esta superposición proporciona un tiempo muy estable, salvo ligeras turbulencias que se producen en el seno de la capa inferior y que dan como resultado la formación de una capa de estratocúmulos, cuyo nivel superior coincide con la inversión de la temperatura.

Esta capa nubosa, denominada **mar de nubes**, se forma por la imposibilidad que tiene el aire inferior - fresco y húmedo - de ascender y desarrollarse verticalmente ante la existencia de un aire superior anticiclónico. El mar de nubes alcanza un gran desarrollo horizontal. Tiene una base muy bien delimitada a causa de la influencia térmica homogénea que proporciona la superficie de la isla. En cambio, en su cima se forman protuberancias, fruto de las turbulencias que se generan en su interior.

El mar de nubes queda retenido en las vertientes septentrionales en aquellas islas que tienen un relieve superior al de su formación, como en Tenerife. En consecuencia, se produce la condensación de parte de su vapor de agua cuando la nube entra en contacto con las masas arbóreas localizadas en las medianías (en torno a 1.000 m de altitud).

Este fenómeno se conoce con el nombre de *lluvia horizontal*. Con el aumento de volumen y de peso, las gotas de vapor caen al suelo produciendo el fenómeno denominado **precipitación de niebla**.

El efecto climático más importante de estos fenómenos es el de suavizar el régimen térmico diario de las áreas situadas por debajo de él, ya que actúan como filtro para las radiaciones solares y las irradiaciones terrestres nocturnas, impidiendo también la difusión de la humedad hacia las capas medias de la troposfera. La inexistencia de este fenómeno en las vertientes meridionales ocasiona importantes oscilaciones térmicas diarias.

#### b) La Corriente de Canarias.

La existencia de una corriente oceánica de aguas frías,- la Corriente de Canarias -, que baña las costas del archipiélago, tiene como efecto más directo la acentuación de la estabilidad de los alisios, además de ejercer un papel atemperante sobre el régimen térmico, fundamentalmente en los sectores costeros.

c) La Proximidad a la costa africana.

Determina que las islas más orientales se vean afectadas con frecuencia por la llegada de aire sahariano que se plasma en el típico "*tiempo sur*", definido por presentar temperaturas elevadas, un fuerte descenso en la humedad atmosférica y una pérdida de visibilidad por la existencia de polvo en suspensión.

d) Las borrascas atlánticas.

La irrupción de masas de aire frescas y húmedas, principalmente en invierno, da lugar a un tiempo inestable con abundantes precipitaciones y un descenso generalizado de las temperaturas.

En consecuencia, el régimen térmico en Canarias se define por presentar unas temperaturas suaves y una amplitud moderada, aunque se producen desigualdades dependiendo de la altitud, la exposición y la proximidad a la costa.

Las precipitaciones suelen ser débiles y muy irregulares en todo el archipiélago. Por lo general, son las zonas de medianías y las cumbres expuestas al norte las más lluviosas.

En la isla de Tenerife, la precipitación media insular es de 425 mm/año. Es más húmeda la vertiente norte, donde se alcanzan los máximos pluviométricos, con medias anuales superiores a los 1.000 mm en las cumbres de Santa Ursula y la Victoria de Acentejo. La costa sur es muy seca; en pocos sitios los módulos pluviométricos anuales sobrepasan los 200 mm/año.

Los valores medios anuales de los indicadores termométricos y de humedad más relevantes correspondientes a algunos de los observatorios termopluviométricos o completos de la isla de Tenerife se observan en la tabla 5.2.

En lo que respecta a las temperaturas, cabe destacar como excepción el valor de -5,1 °C que se obtiene para el régimen medio de temperaturas absolutas del mes más frío en el observatorio de Izaña, ubicado en la línea de cumbres.

Tabla 5.2. Indicadores térmicos y de humedad de Tenerife (fuente: INIA, 1977).

Observatorio	tm	t'	M	P	ETP
Buenavista	16,8	9,0	21,4	798	786
Icod	18,6	9,6	24,4	450	870
Izaña	9,4	-5,1	17,4	464	587
La Guancha	15,7	5,8	22,2	518	751
La Laguna	16,1	3,9	22,7	550	775
Los Rodeos (Aeropuerto)	15,2	4,7	21,2	696	733
Pto. de la Cruz	19,9	10,7	25,4	294	937
Anaga	18,7	9,5	23,5	381	865
Granadilla	16,7	5,8	24,5	286	793
San Andrés	20,6	12,3	25,9	507	982
Sta. Cruz de Tenerife	20,8	11,8	26,7	251	988
Vilaflor	14,8	1,1	23,3	537	734

tm: Temperaturas medias anuales (°C)

t': Temperaturas medias de mínimas absolutas del mes más frío (°C)

M: Temperaturas medias de máximas del semestre más cálido (°C)

P: Precipitación media anual (mm)

ETP: Evapotranspiración potencial media anual (mm)

En cuanto a la distribución estacional de las precipitaciones, en invierno existen grandes diferencias entre unos y otros observatorios, mientras que en verano son muy semejantes, dada su escasa importancia.

### V.2.2. Fisiografía.

El relieve del terreno ejerce un control absoluto sobre la trayectoria que siguen coladas y lahares y se reduce al mínimo en el caso de oleadas piroclásticas y avalanchas (sensu lato).

Tenerife se eleva desde los fondos oceánicos situados a más de 3.000 m de profundidad hasta la cota máxima de 3.718 m en el Pico del Teide, que dista del mar en proyección horizontal

14 Km en dirección N, 20 en dirección SW y 24 en dirección SE, lo que pone de manifiesto lo abrupto del relieve, con una gran variación altitudinal que se produce en escasos kilómetros. Globalmente, la distribución porcentual de la superficie de la isla según altitudes, es la siguiente (tabla 5.3):

**Tabla 5.3.** Distribución porcentual de la superficie de la isla por altitudes.

Intervalo (m)	Porcentaje	Intervalo (m)	Porcentaje
3500-3718	0,03 %	1500-2000	9,58 %
3000-3500	0,49 %	1000-1500	15,47 %
2500-3000	1,03 %	500-1000	25,23 %
2000-2500	9,51 %	0-500	38,66 %

Morfológicamente, en Tenerife se presentan tres grupos de estructuras que definen claramente las características del modelado del relieve (Martínez de Pisón & Quirantes, 1990):

a) Los Macizos Antiguos.

En contraste con los relieves estructurales más jóvenes, su morfología se caracteriza por las profundas incisiones torrenciales, los altos acantilados costeros, los fuertes desniveles y la abundancia de formas estructurales derivadas, consecuencia del importante desmantelamiento que han sufrido (figura 5.5).

El macizo de Anaga ocupa el extremo nororiental de Tenerife y se articula en torno a una directriz predominante NE-SW, lo que proporciona al edificio una morfología lineal con los materiales dispuestos a modo de tejado a dos aguas. Dominan los valles profundos y angostos, de corto recorrido, que se disponen paralelamente entre sí y presentan unas cabeceras muy desarrolladas, polilobuladas. Los interfluvios se presentan como "*cuchillos*" que conectan con el fondo de los barrancos a través de empinadas pendientes que, en ocasiones, llegan a constituir verdaderos escarpes. El importante y generalizado acantilamiento de sus costas y las numerosas formas simples derivadas (pitones, diques, mesas...) son otros de sus rasgos morfológicos más característicos.

El macizo de Teno se dispone en el extremo noroccidental, construido siguiendo la directriz NW-SE, y presenta una morfología similar a la de Anaga, pero con unos barrancos más angostos y profundos. La remodelación constructiva, de tipo puntual, se pone de manifiesto principalmente con la formación de extensas islas bajas (Buenavista-Los Silos y Teno Bajo).

El tercer macizo antiguo aflorante en la isla es el del Roque del Conde, situado en las inmediaciones de Adeje.

#### b) Las Dorsales.

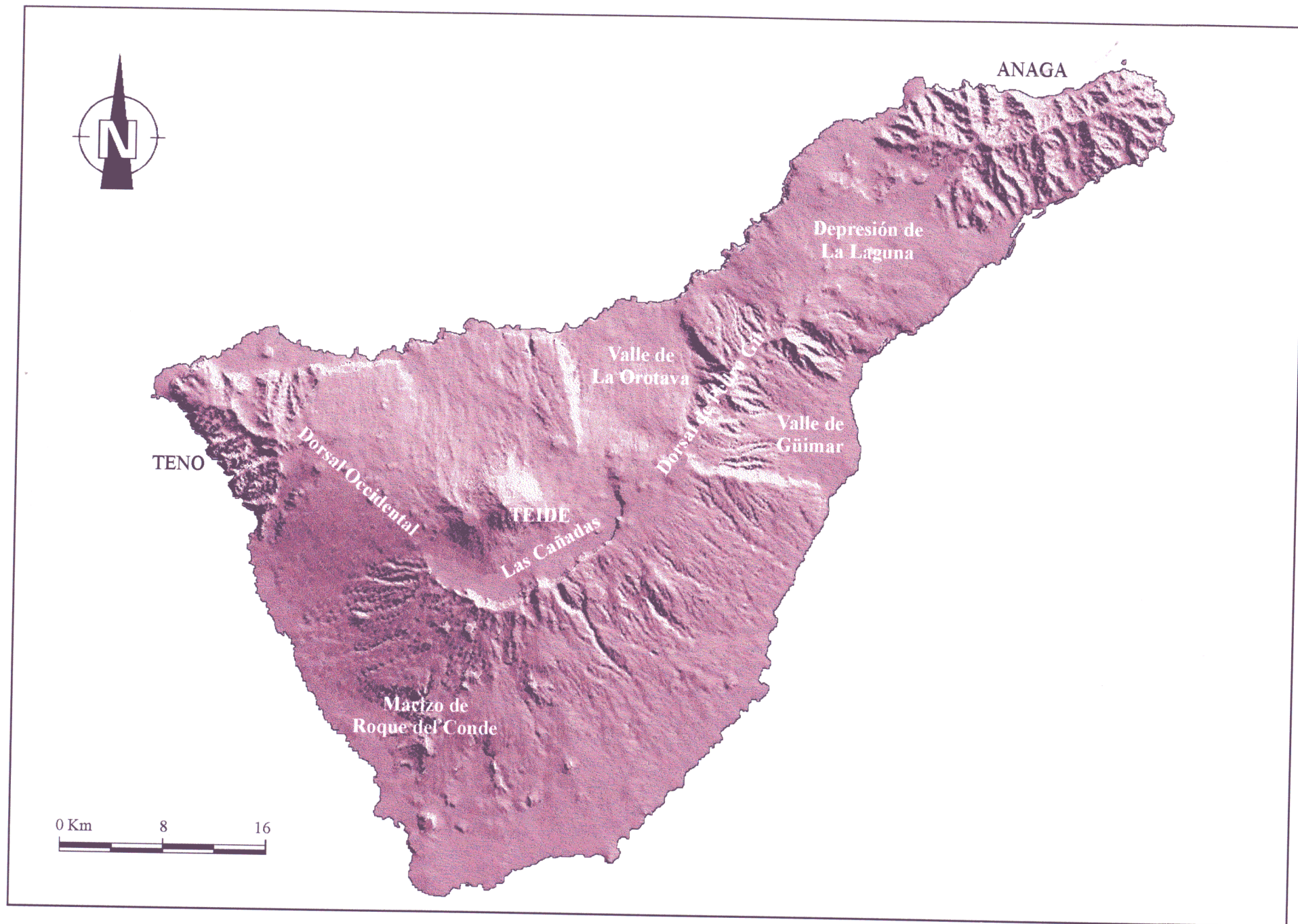
Son edificios lineales que resultan de la imbricación y yuxtaposición de múltiples erupciones autónomas que siguen una directriz dominante. La concentración de la máxima actividad en torno a la fractura principal provoca que la línea de cumbres coincida con dicho eje estructural, desde donde los materiales divergen en forma de tejado a dos aguas. Uno de sus rasgos morfológicos más destacados es la concentración de conos de piroclastos en las áreas de cumbre.

La Dorsal de Pedro Gil (figura 5.5), enlaza Anaga con el edificio central de la isla. Aun cuando su morfología está dominada por las formas volcánicas directas, es frecuente que en sus flancos se abran profundos barrancos y amplias calderas de erosión, como la que da nombre a esta Dorsal, en la que se produjo la erupción histórica de Las Arenas (1704). Sin embargo, los barrancos no están tan desarrollados como en los macizos antiguos y quedan separados entre sí por amplios interfluvios en rampa.

En los flancos de la Dorsal se abren dos amplias depresiones: el Valle de la Orotava hacia el Norte y el Valle de Güimar hacia el SE. Se trata de rampas de suave pendiente que descienden desde el eje de la dorsal, de unos 7 a 10 km de anchura, limitadas por paredes rectas fuertemente escarpadas.

Entre Teno y el edificio central, se dispone también un edificio con las características de dorsal, pero con una morfología mucho menos desarrollada que la de Pedro Gil.





**Figura 5.5.** Localización de los principales conjuntos morfoestructurales de la isla de Tenerife.

## c) El Teide y Las Cañadas.

Es la morfoestructura más compleja del archipiélago. Resultante de la imbricación en el espacio y en el tiempo de diferentes estructuras igualmente complejas (dorsales sálicas, caldera, estratovolcán, etc.), su edificación tiene lugar a lo largo de un dilatado ciclo eruptivo en el que se pueden diferenciar tres etapas principales a las que corresponden las tres unidades morfológicas mayores del conjunto: construcción del Edificio Cañadas, apertura de la caldera y construcción del estratovolcán Teide-Pico Viejo.

El Edificio Cañadas ocupa la parte central de la isla. Las cumbres actuales del mismo se disponen en la confluencia de ambas dorsales y su frente morfológico configura el actual escarpe de la Caldera. Del primitivo edificio sólo se conoce parte de sus laderas Sur, Este, SW y NE, que caen periclinamente hasta la costa desde las zonas centrales, donde se alcanzan cotas superiores a los 2.700 m. La base visible tiene casi 40 Km de diámetro y coincide con el círculo máximo que puede inscribirse en el perímetro triangular de Tenerife. La parte sumital ha desaparecido, dejando en su lugar una depresión que constituye la Caldera de las Cañadas.

La Caldera de Las Cañadas (figura 5.5), con un perímetro de 45 Km y un diámetro máximo de 16 Km, es una depresión relativamente llana con alturas comprendidas entre 2.100 y 2.400 m. Está cerrada al sur por una pared que en algunos puntos se eleva a más de 500 m sobre la base y cuyos escarpes configuran un arco de elipse intensamente retocado por la erosión. El borde septentrional no aflora, al quedar cubierto por las coladas del Teide-Pico Viejo. En su interior, una agrupación de raíces de volcanes y brechas (Los Roques de García) en forma de espigón alineado en dirección SE-NW, enlaza con la pared meridional en Montaña Guajara y divide la Caldera en dos grandes cubetas, la menor de las cuales es la occidental, cuya plataforma queda también unos 200 m más baja (Llano de Ucanca). Al norte, una construcción aislada (La Fortaleza), pero en evidente relación con el resto, completa el edificio.

El estratovolcán Teide-Pico Viejo (3.718 m) se levantó en el interior de la Caldera de Las Cañadas, sobre una base que debió encontrarse casi a 2.000 m de altura. Sus materiales rellenan la Caldera y la cierran en su sector norte, convirtiéndola en un área endorréica.

La evolución magmática del Teide ocasionó una fase tardía de extrusión de domos que se emplazan en áreas periféricas del edificio rodeándolo. Construido con posterioridad, el Pitón es un cono culminante que se superpone al edificio y se construyó durante la efusión de las coladas negras que cubren radialmente los flancos del estratovolcán.

Por último, a las morfoestructuras poligénicas hay que añadir las edificadas por erupciones simples en época reciente, de carácter diverso según el tipo de materiales y la dinámica eruptiva. Predominan los conjuntos de conos de piroclastos y coladas "aa" o "pahoehoe" que pueden aparecer insertos en estructuras complejas o conformado campos y alineaciones.

En la isla escasean las zonas llanas, destacando la vega localizada en los alrededores de La Laguna, que se originó como consecuencia del cierre temporal de los barrancos en este sector por coladas lávicas, lo que dio lugar a una deposición endorréica, con episodios lagunares.

En cuanto al relieve submarino, las vertientes N de Tenerife están caracterizadas por la prolongación en profundidad de la morfología característica de los macizos de Anaga y Teno, entre los cuales se sitúan una serie de cañones submarinos reconocibles hasta profundidades de 2800 m. Alrededor de los 3000 m se han distinguido estructuras tipo abanico que contienen numerosos bloques los cuales parecen haber sido transportados hasta allí por procesos de tipo avalancha (debris flow) (Acosta et al., 1996; Muñoz et al., 1996; Palomo et al., 1996).

La morfología de Teno y Anaga es similar en sus dos vertientes. Presentan una plataforma costera estrecha que se continúa en una pendiente bastante pronunciada, la cual se mantiene hasta profundidades importantes. Esta morfología submarina limita la influencia que puedan tener sobre tierra firme erupciones generadas en las proximidades de la costa. Sin embargo, la presencia en profundidad de bloques de gran tamaño es indicativa de que en la zona han sido frecuentes avalanchas de importante magnitud a partir de las cuales podrían generarse tsunamis.

Por su parte, las vertientes S de la isla presentan una plataforma bien desarrollada, lo que las convierte en las zonas más susceptibles a erupciones freáticas costeras, mientras que la incidencia de las avalanchas parece haber sido mucho menor.

### V.2.3. Hidrología e Hidrogeología.

En la isla de Tenerife, la hidrografía consiste únicamente en la existencia de numerosos, cortos y profundos barrancos excavados por las aguas de escorrentía (figura 5.6). Esta profusión de barrancos viene acentuada por la accidentada topografía, la erosionabilidad del terreno y el régimen estacional de lluvias (Plan Hidrológico Insular, 1989).

Los barrancos de la vertiente Norte son, en general, más cortos y menos profundos que los de la Sur, dado que los materiales de ésta son más blandos que los de aquélla y que la vegetación natural es menos intensa en el Sur, lo que aumenta su erosionabilidad.

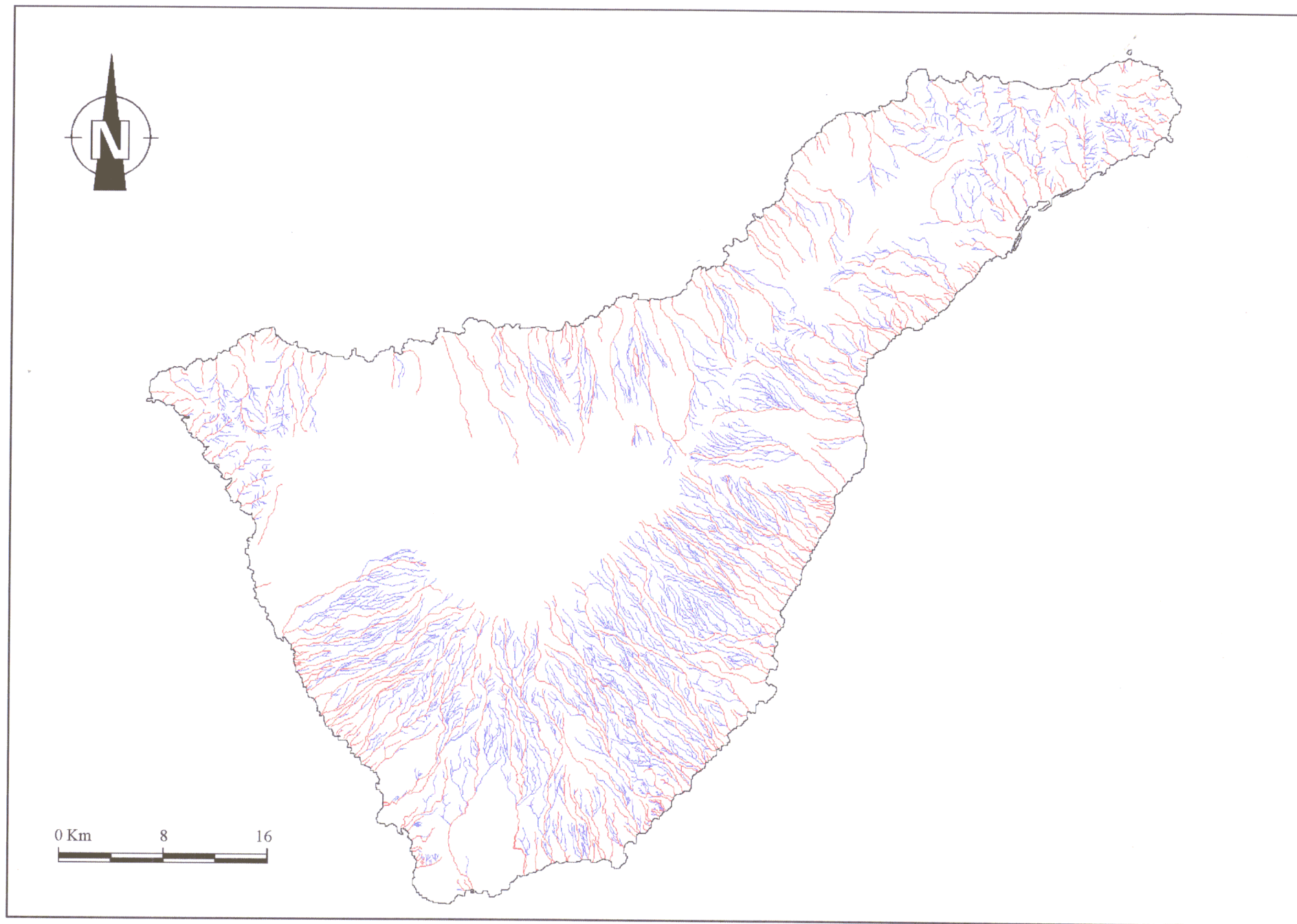
Por los barrancos circula agua muy raras veces; sólo con ocasión de los temporales de lluvias más intensos. Estas avenidas o tormentadas son poderosas y efímeras, puesto que las fuertes pendientes facilitan la aceleración del agua, que arrasa lo que encuentra a su paso. Cesadas las lluvias, los cauces se secan de nuevo.

En cuanto a las aguas subterráneas de Tenerife, se disponen principalmente en un acuífero basal que culmina bajo el centro de la isla en cotas próximas a los 2.000 m sobre el nivel del mar (Plan Hidrológico Insular, 1989).

El crecimiento del relieve de la isla por acumulación progresiva de materiales con características heterogéneas, ha dado lugar a la existencia de "*unidades estratigráficas*" que difieren en composición, edad y grado de alteración y compactación, de modo que se comportan de forma distinta ante el flujo del agua subterránea.

La estructura geológica resultante,- de unidades superpuestas y suavemente inclinadas hacia el mar en cada vertiente -, determina la concepción de un modelo hidrogeológico en "*capas superpuestas*" de permeabilidad creciente hacia abajo, si bien no todas ellas son internamente homogéneas ni tampoco se extienden a la totalidad del ámbito de la isla.

La configuración de la superficie freática en este modelo está condicionada por la presencia del zócalo impermeable (correspondiente con las series antiguas), y su espesor por la permeabilidad de los materiales que alojan el agua (figura 5.7a).



**Figura 5.6.** Distribución de la red de barrancos de Tenerife. En rojo aparecen marcados los cauces principales.

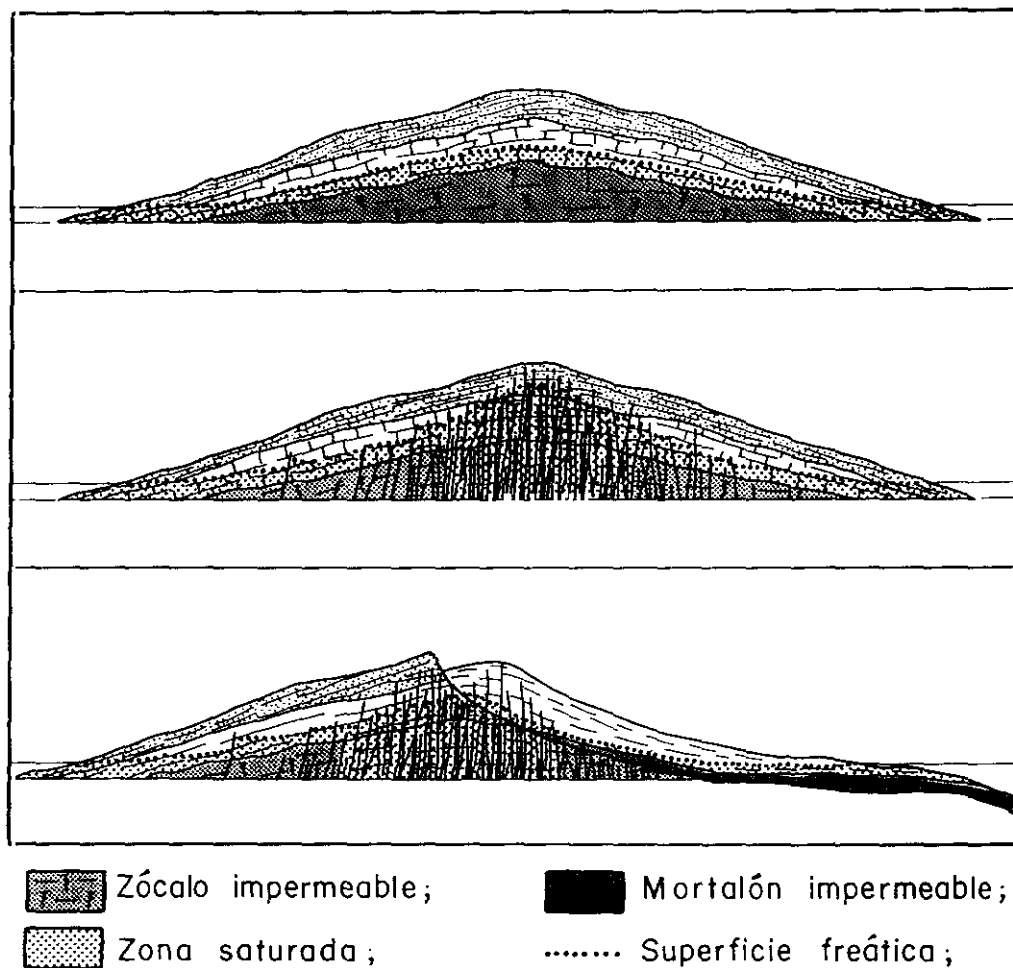
El modelo en capas queda interrumpido en la zona de Dorsales, donde la densa intrusión filoniana y la fracturación secundaria abierta inducen una permeabilidad fisural que atenúa e incluso invierte las diferencias originales de comportamiento (figura 5.7b).

En estas zonas la permeabilidad es elevada a causa de la fracturación abierta y alcanza un valor máximo en los sentidos vertical y longitudinal (en paralelo con el eje de la dorsal), pero transversalmente (sentido cumbre-mar) se hace muy baja por la presencia de diques. En consecuencia, la superficie freática queda sobreelevada y adquiere un perfil escalonado de pendiente muy fuerte y el espesor de la zona saturada aumenta considerablemente.

De la misma manera, en los valles de la Orotava, Güimar e Icod el modelo en capas queda truncado, dando lugar a un dispositivo hidráulico mucho más simple determinado por la presencia de un basamento impermeable (mortalón), de superficie suavemente inclinada hacia el mar e irregular en detalle y un relleno de lavas de conductividad hidráulica muy elevada, en el que se instala la zona saturada (figura 5.7c).

Los claros contrastes que presenta el modelo de circulación insular evitan que el sistema acuífero de la isla se pueda considerar como una unidad homogénea. Las principales diferencias que se producen entre zonas, como consecuencia de la ruptura del modelo en capas, son:

- a) El volumen de agua que se infiltra varía mucho de unas zonas a otras.
- b) El medio físico es extraordinariamente heterogéneo y anisótropo. Se producen fuertes variaciones de los parámetros hidrogeológicos tanto vertical como lateralmente.
- c) Hay zonas donde la circulación subterránea del agua está condicionada por la presencia de un zócalo impermeable, mientras que en otras no existe el zócalo por encima del nivel del mar.
- d) Después de casi un siglo de explotación, la zona saturada general ha experimentado extracciones muy variables y el volumen de reservas disponibles actualmente no es el mismo en todas las zonas.



**Figura 5.7.** Esquemas hidrogeológicos de la isla de Tenerife (a partir del Plan Hidrológico Insular, 1989).

- (a) La existencia de unidades estratigráficas da lugar a una estructura en capas superpuestas. La configuración de la superficie freática está controlada por la presencia del zócalo impermeable y el espesor de la zona saturada es mayor o menor según la permeabilidad de la unidad estratigráfica que aloja el agua.
- (b) El modelo anterior queda interrumpido en el ámbito de los ejes estructurales, donde la intrusión filoniana y una intensa fracturación secundaria han transmutado el comportamiento de las unidades estratigráficas, incluyendo la Serie I.
- (c) Dispositivo hidráulico en las áreas de grandes deslizamientos en masa y depresiones gravitacionales. Este es mucho más simple que en los casos anteriores, con un contraste muy fuerte de permeabilidad entre el área de rellenos lávicos y el fondo de la depresión.



Así pues, basándose en las características hidrogeológicas locales, las peculiaridades de las obras que lo explotan, sus diferencias hidroquímicas, su grado de conocimiento y las futuras estrategias de explotación, el Plan Hidrológico Insular ha clasificado la superficie insular en una serie de unidades territoriales relacionadas con zonas, subzonas y sectores hidrogeológicos (tabla 5.4, figura 5.8).

**Tabla 5.4.** Zonación hidrogeológica de la isla de Tenerife (PHI, 1989).

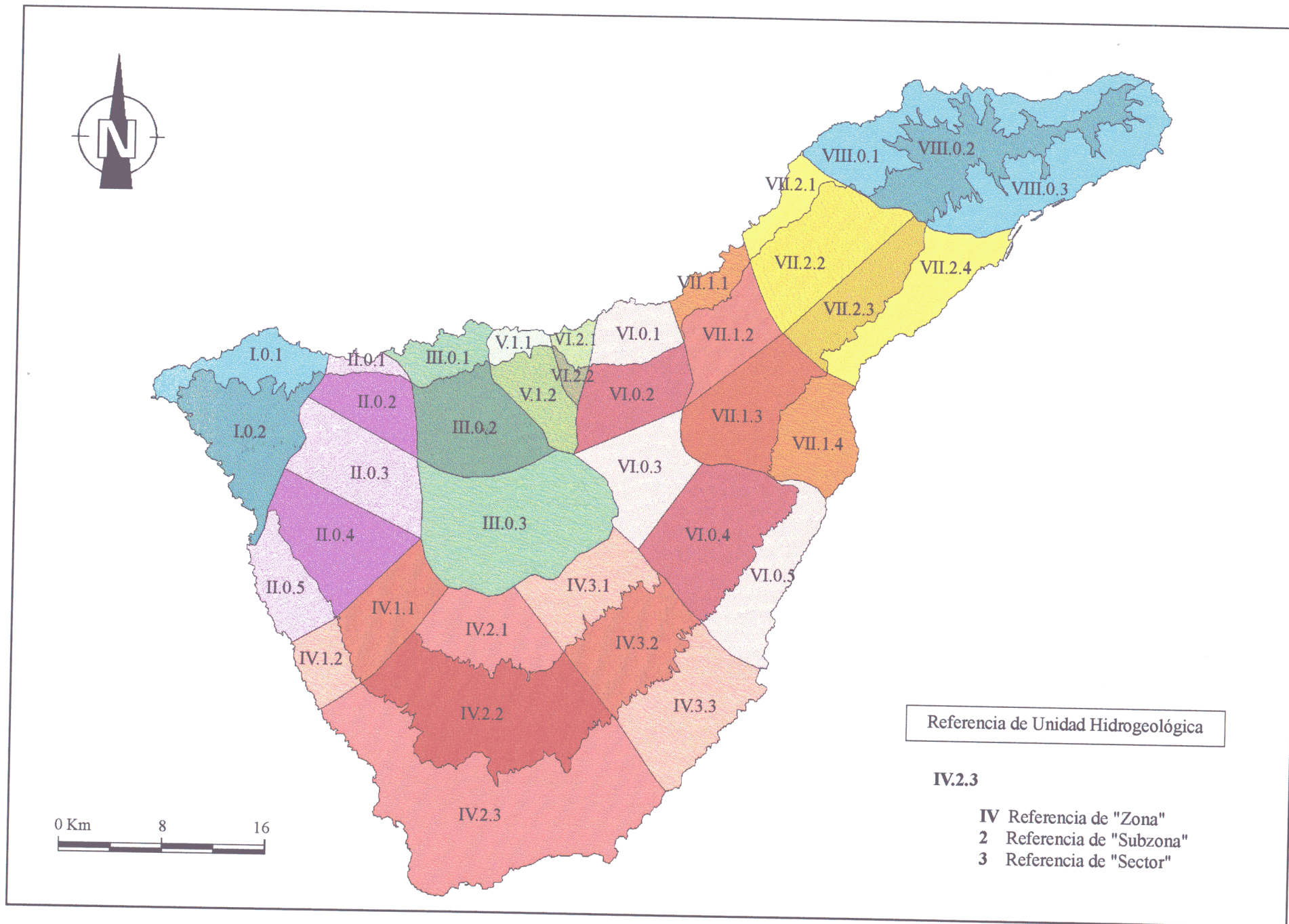
Código de Zona	Distribución Superficial
I	Se corresponde con el macizo de Teno.
II	Se extiende entre Teno y el área de Las Cañadas, centrada en torno a la Dorsal NW.
III	Corresponde a la depresión de las Cañadas y el valle de Icod-La Guancha.
IV	Incluye el sector comprendido entre Las Cañadas por el Norte y el mar por el Sur.
V	Corresponde al macizo de Tigaiga.
VI-VII	Estas zonas abarcan la Dorsal de Pedro Gil. La separación entre ambas se ha hecho en función de diferencias en el grado de explotación y no al funcionamiento hidrodinámico.
VIII	Corresponde al macizo de Anaga.

El conocimiento de la estructura de los acuíferos en la isla resulta fundamental a la hora de establecer el grado de susceptibilidad que existe frente a la posible intervención de agua en una erupción cualquiera. Este dato tiene gran relevancia ya que puede significar la modificación de las condiciones en las que se desarrolla el fenómeno, potenciando la ocurrencia de erupciones de tipo freatomagmático.

#### **V.2.4. Vegetación.**

La vegetación es un elemento que puede influir de forma significativa en la propagación de los efectos indirectos derivados de las erupciones volcánicas. La facilidad de combustión de algunas especies arbustivas y arbóreas (que se ve agravado si las condiciones climáticas son especialmente secas) convierte a las zonas en las que éstas se disponen en áreas especialmente susceptibles a la propagación de incendios.





**Figura 5.8.** Zonación hidrogeológica de la isla de Tenerife (fuente: Plan Hidrológico Insular, 1989).

La peculiar organización vertical de las capas inferiores de la atmósfera en la isla de Tenerife atribuye a la vegetación un rasgo esencial que es el de su articulación espacial en pisos que presentan una gran complejidad interna derivada de los cambios locales de las condiciones medioambientales impuestas por el relieve. Se reconocen cinco bandas altitudinales diferenciadas por sus características fitoclimáticas (figura 5.9).

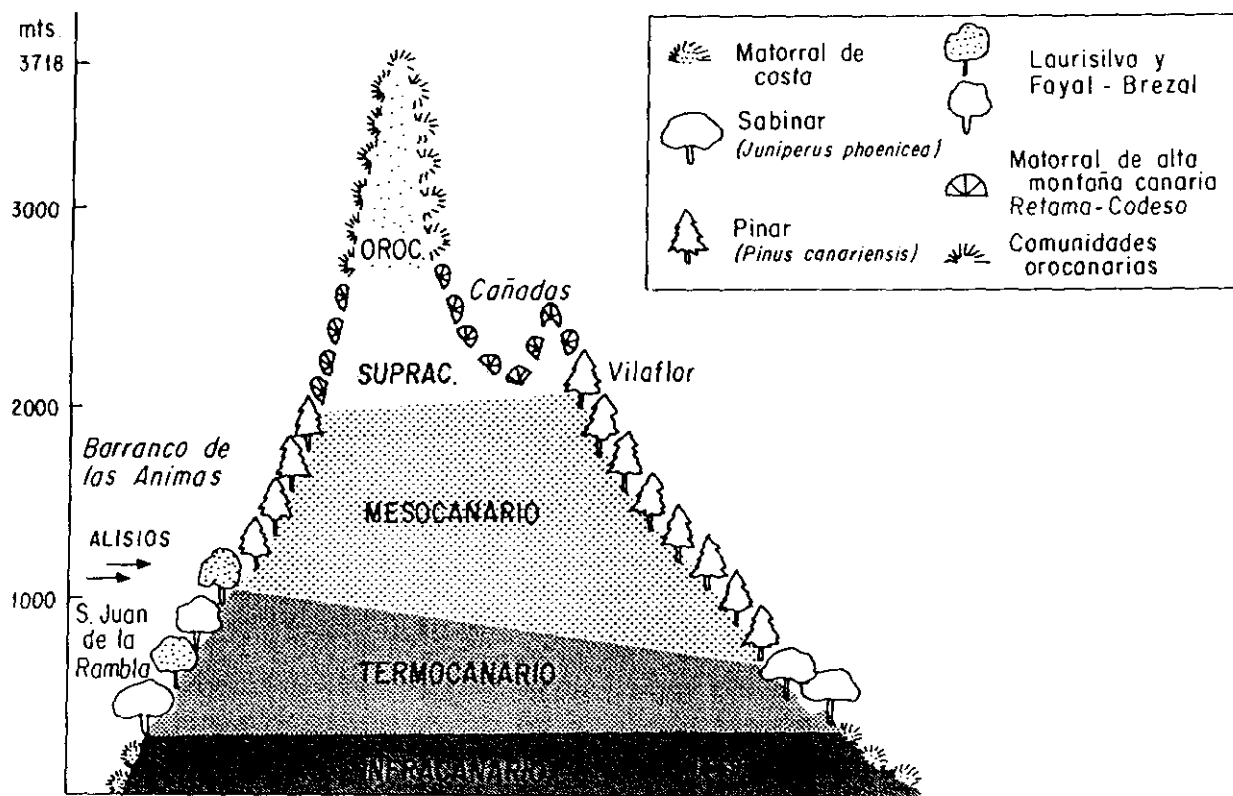


Figura 5.9. Cliserie altitudinal de la isla de Tenerife (en El País-Aguilar, 1993).

En la banda inferior o "*piso basal o infracanario*", que goza de unas condiciones climáticas semiáridas y se desarrolla entre el nivel del mar y los 400 a 800 m, se desarrolla un tipo de vegetación marcadamente xerófila, emparentada fitogeográficamente con las estepas de suculentas de la zona sahara-marroquí y del sur de África.

A cotas variables según la exposición, se desarrolla un conjunto de unidades de vegetación que se disponen como una transición entre las formaciones xerófilas de costa y la laurisilva en las vertientes septentrionales o el pinar en las meridionales.

A partir de los 500 m y hasta los 1.200 m se desarrolla el "*piso termocanario*", apareciendo en las vertientes septentrionales, - en estrecha relación con las condiciones de humedad creadas por el mar de nubes -, un piso de vegetación de carácter mesófilo: la laurisilva, que se caracteriza por ser un bosque pluriespecífico de carácter umbrófilo y termófilo.

En las vertientes a barlovento, esta formación se ve sustituida por el fayal-brezal que, ocasionalmente, puede también aparecer en las cumbres más elevadas de sotavento. También aparece a sotavento cuando el monte verde de laurisilva se ve sometido a condiciones de degradación antrópica.

A partir de los 1.200 - 1.400 m en las vertientes de sotavento y desde los 400 - 500 m en las de barlovento se extiende el "*piso montano seco o mesocanario*", definido por el pino canario, el cual representa la manifestación forestal más extensa de la isla. Constituye un bosque monótono, con una densidad de recubrimiento desigual y un sotobosque escaso y pobre florísticamente.

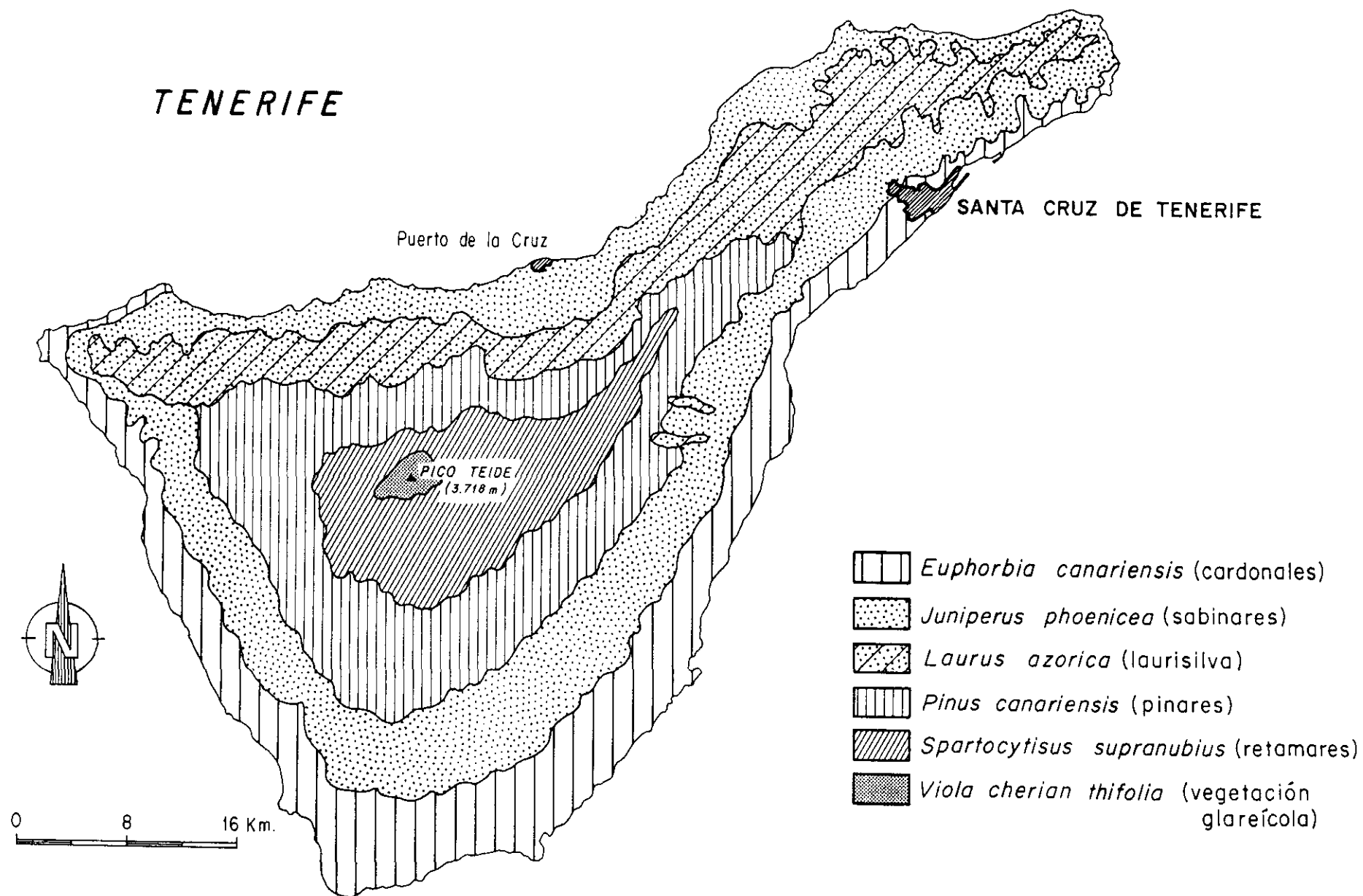
Desde los 2.000 m, las condiciones climáticas son desfavorables al crecimiento del bosque y se ve sustituido por matorral de leguminosas, que caracteriza el "*piso supracanario*". Esta formación se presenta como un matorral de montaña (retama del Teide) constituido por arbustos de hasta dos o tres metros de altura, en formación abierta y dominado por pocas especies, con acompañantes que, en general, son leñosas de pequeña talla y herbáceas.

A partir de los 2.300 - 2.600 m de altitud las condiciones del medio se hacen extremas y la vegetación pierde diversidad y se hace rala hasta prácticamente desaparecer. Las escasas especies resistentes constituyen el "*piso orocanario*".

La distribución espacial de los distintos pisos identificados en Tenerife se puede observar en la figura 5.10.

### V.3. Características socioeconómicas.

Se desarrollan a continuación aquellos aspectos socioeconómicos más característicos y relevantes de la isla de Tenerife para el estudio del riesgo volcánico.



**Figura 5.10.** Series de vegetación de la isla de Tenerife (Rivas Martín, 1987).

### V.3.1. Población.

La población total de la isla de Tenerife, según datos del Instituto Canario de Estadística para el año 1993, es de 685.583 personas. La juventud demográfica es su rasgo más peculiar, siendo el grupo con mayor dominio el de la población adulta. Por sexos, la emigración que ha afectado a los hombres es motivo de que haya una clara diferencia a favor de las mujeres.

En cuanto a su distribución, en la isla existen numerosos núcleos de población de reducido tamaño que se denominan barrios. Cuando se encuentran localizados en áreas escarpadas, - como es el caso de los macizos antiguos -, la encajada red de drenaje da lugar a que surjan pequeñas comunidades agrícolas prácticamente incomunicadas aprovechando aquellas zonas en las que se han formado pequeños valles, como es el caso de Taganana en el macizo de Anaga.

En aquellas zonas en las que la topografía se ha visto suavizada por la existencia de rellenos de materiales volcánicos, se produce una elevada concentración de núcleos de población, de carácter disperso, orientados hacia el aprovechamiento agrícola del suelo, lo que es común por ejemplo en los valles de Tegueste o Icod.

En las costas septentrionales, la morfología acantilada ha dificultado desde siempre la existencia de puertos naturales, por lo que son escasas las poblaciones de importancia. Cabe destacar entre ellas Garachico y el Puerto de la Cruz, que sufrieron en ambos casos los efectos destructivos de la acción de coladas.

Entre los principales núcleos urbanos destacan La Laguna y la capital, Sta. Cruz de Tenerife. Entre ambas concentran prácticamente el 50% del total de la población. La primera se asienta sobre una de las escasas planicies que existen en la isla, mientras que la capital se encuentra situada en la confluencia de una serie de barrancos.

En cuanto al crecimiento demográfico, ha sido muy elevado en los últimos treinta años, con tasas muy por encima de la media del país y su origen en el crecimiento natural nato de la población, ya que la influencia de las migraciones es muy pequeña.

En consecuencia, la densidad de población se ha visto incrementada de forma importante, con una media de 290 hab./Km<sup>2</sup> para el total de la isla, frente al valor nacional de 75 hab./Km<sup>2</sup>, aunque están más pobladas las comarcas del Norte de la isla que las del Sur (figuras 5.11 y 5.12).

### V.3.2. Agricultura.

La agricultura muestra una clara dualidad: junto a los cultivos de regadío dedicados a la exportación coexiste una agricultura de secano, con regadío marginal, enfocada al autoconsumo y al mercado interior (tabla 5.5, figura 5.13).

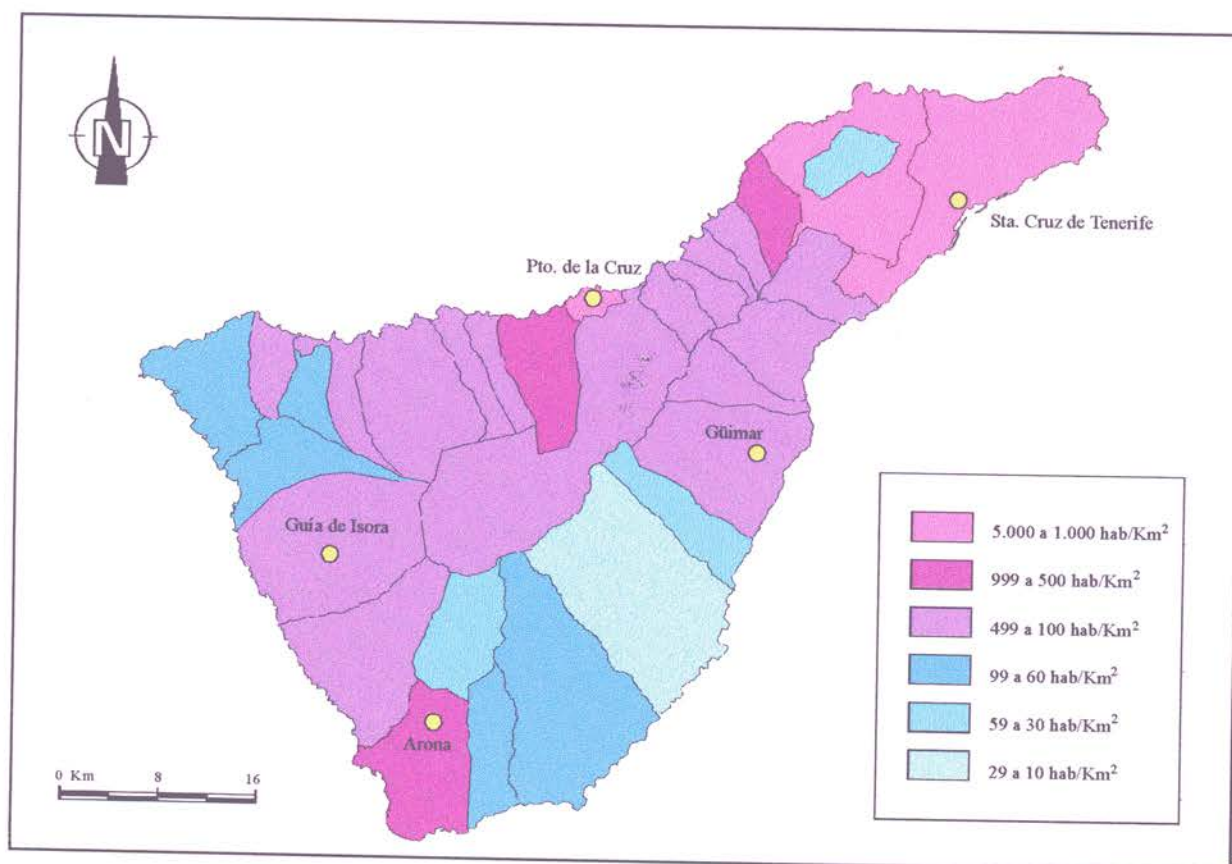
La agricultura de exportación, - en régimen de regadío -, basada en cultivos tropicales o fuera de temporada, de elevado precio, se localiza en los sectores costeros de las vertientes septentrionales en cotas inferiores a los 400 m, con mejores suelos y temperaturas y mayor humedad. Las mayores superficies en regadío corresponden a los cultivos herbáceos extensivos y a la huerta, siguiendo en importancia la platanera, el viñedo y los frutales.

Esta agricultura comercial, por su estrecha dependencia de los mercados exteriores, ha sufrido graves crisis, lo que ha provocado un profundo cambio en el paisaje agrario. En la actualidad, se ha iniciado cierta diversificación, introduciendo productos como las hortalizas y flores y frutos subtropicales en régimen de invernadero.

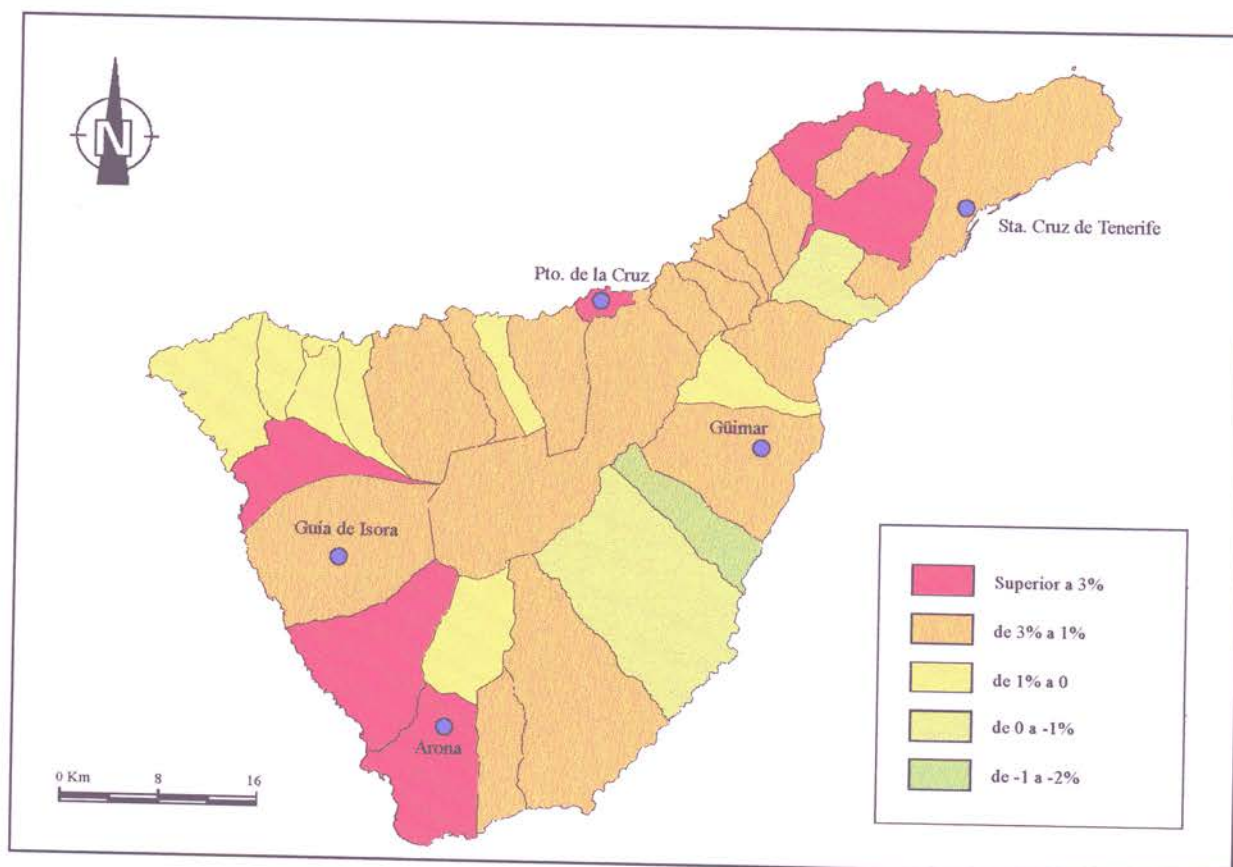
Paralelamente a la agricultura de exportación, en los sectores de medianías (400 - 1.000 m) se ha desarrollado una agricultura de secano que se entremezcla con viñedos, frutales de secano, pastizales y matorrales, cediendo sitio a estos últimos progresivamente conforme se asciende en altitud.

Se consideran como superficie de pastizal aquellos terrenos poblados por especies espontáneas (entre las que predominan las herbáceas), susceptibles de aprovechamiento mediante pastoreo, que se caracterizan por el hecho de que es frecuente una variabilidad en la producción a lo largo de los años. Una parte de estos pastizales corresponden a parcelas de regadío que se han dejado de cultivar provisionalmente, pero que mantienen su infraestructura de riego.





**Figura 5.11.** Densidad de población en Tenerife para el año 1.986 (en El País-Aguilar, 1993).



**Figura 5.12.** Tasas de variación de la población en Tenerife para el período 1.960-1.986 (en El País-Aguilar, 1993).

En cuanto a los pastos naturales, se distribuyen principalmente en el área de transición entre los pisos infra y termocanario, con cotas máximas de 600 m y mínimas de hasta 300 m.

**Tabla 5.5.** Principales usos y aprovechamientos de Tenerife (M.A.P.A, 1988).

Usos del Suelo	Superficie (ha)	Porcentaje	Usos del Suelo	Superficie (ha)	Porcentaje
Coníferas-frondosas	395,36	0,19	Matorral-frondosas	647,91	0,31
Coníferas	37.920,69	18,44	Matorral s.s.	94.838,16	46,12
Frondosas	2.699,15	1,31	Palmeral	24,65	0,01
Frutales regadío	283,17	0,14	Pastizal-frutales	53,12	0,03
Frutales seco	519,71	0,26	Pastizal s.s.	4.191,96	2,03
Improductivo	18.353,74	8,93	Plátano	7.202,89	3,50
Labor	15.515,87	7,54	Regadío	18.019,85	8,76
Matorral-coníferas	3.385,10	1,66	Viñedo	1.568,72	0,77

Dentro de la definición de matorral quedan englobados todos aquellos terrenos poblados predominantemente por especies arbustivas o sufruticosas (incluyendo también las áreas de pastizal asociado a matorral con porcentajes de éste entre el 20 y el 60%). Se reflejan en este grupo los diferentes hábitats o "climax" característicos de la isla que ya se describieron en el apartado V.2.4. Su extensión superficial es la más importante de todos los usos del suelo.

La superficie forestal es la segunda en importancia después del matorral. Caben destacar por su extensión a nivel municipal los términos de Icod de los Vinos, La Orotava, Adeje, Arico, Guía de Isora, Güimar y Vilaflor en lo que respecta a superficie ocupada por coníferas. La Laguna, Los Silos, Tegueste y El Rosario son los municipios donde se localizan principalmente las áreas de frondosas y la asociación coníferas-frondosas se presenta en los municipios de La Orotava, Los Realejos, S. Juan de la Rambla, Sauzal y El Rosario.

Por último, se consideran improductivos todos aquellos terrenos que se caracterizan por su incapacidad para producir especies vegetales. Se distingue entre improductivos agrarios (constituidos por terrenos agrícolas desnudos de toda vegetación) y no agrarios (constituidos por núcleos urbanos, carreteras, etc.).



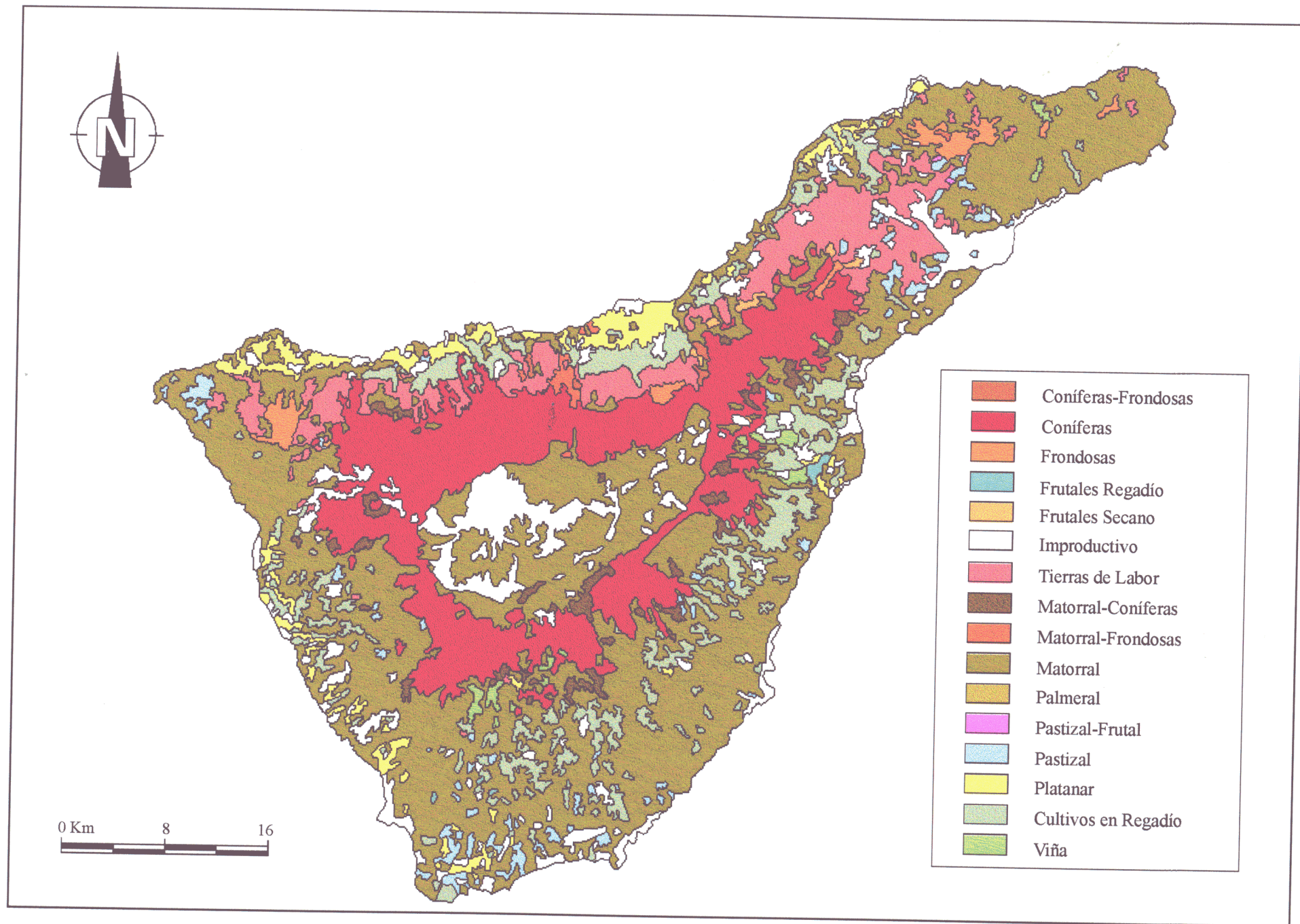


Figura 5.13. Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de la isla de Tenerife (MAPA, 1989).

### V.3.3. *Infraestructuras.*

#### a) Infraestructuras de transporte.

Cabe destacar, entre las infraestructuras de transporte que constituyen las vías de comunicación de la isla, las marítimas, las aéreas y la red viaria (figura 5.14).

El Real Decreto de Franquicias de 1.852 potenció a los puertos canarios como estaciones marítimas de tránsito en las rutas intercontinentales y determinó el crecimiento del comercio exterior. Las comunicaciones marítimas ven reforzada en la actualidad su importancia tradicional por la favorable situación del archipiélago en el conjunto de las rutas atlánticas, destacando el puerto de Santa Cruz de Tenerife, por su carácter de "franco".

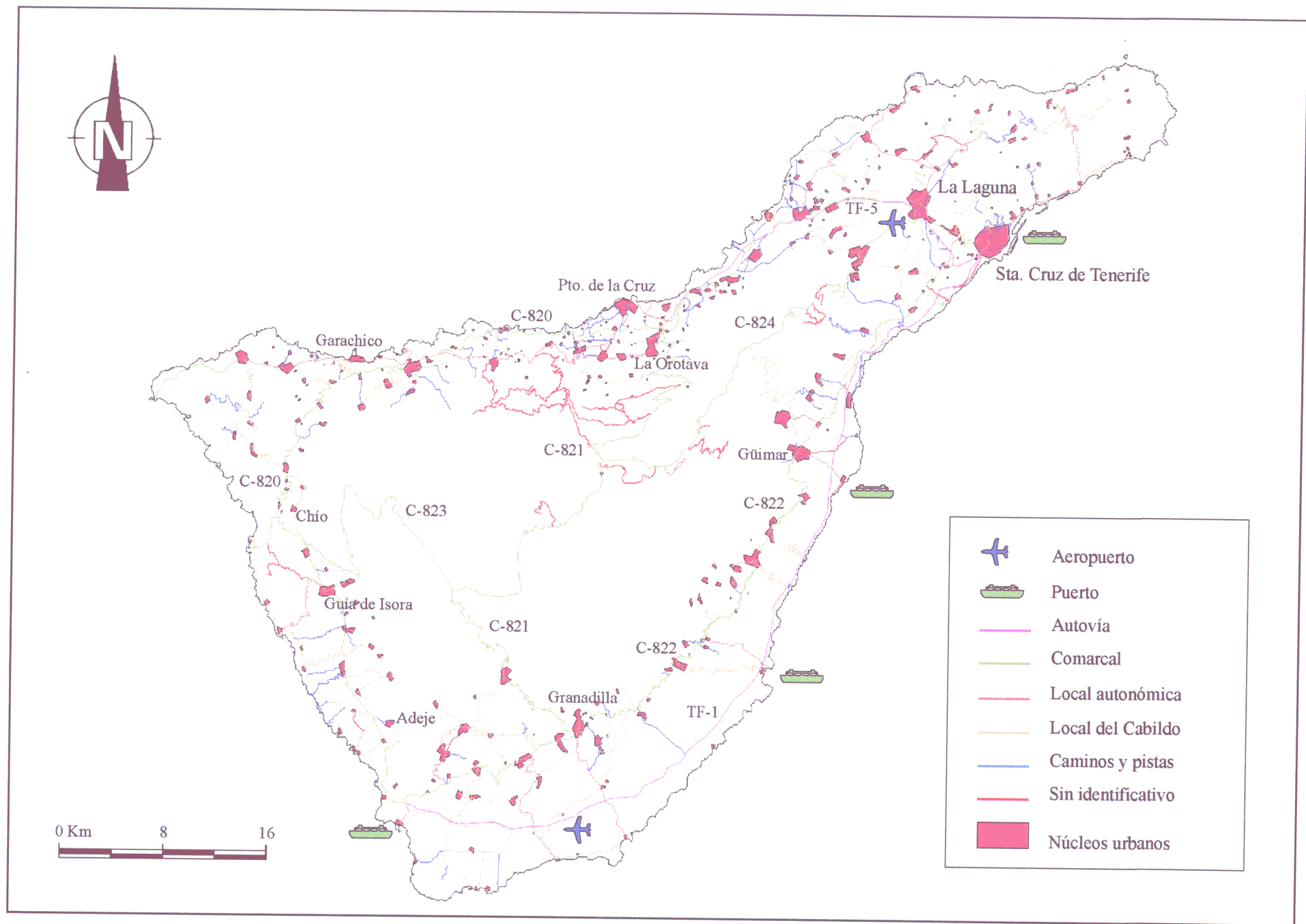
Asimismo, el tráfico aéreo, cuya importancia va en aumento con el movimiento turístico en las islas, contribuye al funcionamiento de la economía de mercado dada su gran dependencia del exterior. Los aeropuertos de Los Rodeos y Reina Sofía registran un elevado movimiento de tráfico nacional e internacional.

Los transportes terrestres han tenido un lento y costoso desarrollo. La carretera es el único medio de comunicación por tierra. Las vías de comunicación están trazadas con origen en la capital de la isla para determinar una red de circunvalación, partiendo de la cual nacen otras carreteras transversales o radiales.

La circunvalación de la isla de Tenerife se establece mediante las comarcales 820 y 822 que, partiendo de Santa Cruz, recorren el Norte y Sur del territorio respectivamente, uniéndose al Oeste, en Tijoco de Abajo, entre Adeje y Guía de Isora.

Las comunicaciones interiores de la isla están constituidas por:

- 1) La C-821 que une la C-820, desde La Orotava, con la C-822 en Granadilla de Abona, tras recorrer el Valle de La Orotava y Las Cañadas con dirección SW y tomar en el Llano de Ucanca rumbo SE.



**Figura 5.14.** Vías de comunicación principales de Tenerife, localización de núcleos urbanos, puertos y aeropuertos.

- 2) La C-823 que enlaza la C-820 desde Chío, al Norte de Guía de Isora, con la C-821, en el Llano de Ucanca.
- 3) La C-824 que, poniendo en comunicación la C-820, desde S. Cristóbal de La Laguna, con la C-821, en El Portillo, permite el acceso a la emisora de televisión.

Por último, cabe destacar el trazado de las autopistas TF-1, que recorre la costa SE paralela a la C-822 y une Santa Cruz con la Playa de Las Américas y la TF-5, que recorre la costa Norte paralela a la C-820 y une la capital con el Puerto de la Cruz.

En la isla existen también numerosas pistas forestales y caminos que recientemente se han asfaltado en zonas como Anaga y Teno, lo que ha facilitado el acceso a casi cualquier punto de la isla.

#### b) Infraestructuras hidráulicas.

Prescindiendo de algunos manantiales naturales y de algunos acuíferos colgados explotados por galerías-naciente, que en total extraen unos 400 l/s (5,9% de la producción total), Tenerife se abastece de aguas subterráneas profundas localizadas en una zona saturada general. La extracción de estas aguas se realiza mediante perforaciones horizontales (galerías) y verticales (pozos de gran diámetro y pozos-sondeo).

Una galería es un túnel de una sola boca y ligera pendiente con caída hacia ella, a favor de la cual sale el agua de sus alumbramientos. Su sección transversal es reducida, generalmente menos de 2 m de altura por 1,80 de anchura. Cuando la perforación llega a una zona saturada, el agua brota o cae al interior de la obra y desde allí sale a la superficie a través de un canal o tubería instalados con tal propósito.

El número de galerías ejecutadas en la isla supera el millar, con más de 1.600 Km perforados. Se encuentran situadas en las zonas de medianías y cumbre, no existiendo ni en la zona de Las Cañadas ni en la costera. Su longitud es muy variable, llegando a alcanzar los 8 Km. Su caudal oscila entre los 250 l/s y el cero absoluto. Actualmente hay alrededor de 350 productivas, habiéndose agotado los alumbramientos de muchas de ellas.

Los pozos responden a dos tipologías básicas. La más abundante es la de pozo canario típico. Consiste en una perforación vertical de gran diámetro (entre 2 y 3 m) que se ejecuta con explosivos. En su fondo se pueden abrir galerías horizontales, en ocasiones de longitud superior al kilómetro. La segunda es la del pozo-sondeo. El número de pozos productivos es de unos 120.

Debido a la alta permeabilidad de sus suelos, salvando las zonas de Anaga y Teno, Tenerife ofrece condiciones muy poco favorables para la construcción de embalses. En realidad, para los pocos que hay ejecutados o en ejecución se requiere la impermeabilización total de su superficie. El volumen total de aguas superficiales aprovechado se estima en 1 Hm<sup>3</sup>.

Para almacenar las aguas que sobran de las galerías en épocas invernales, cuando no es menester el riego, la iniciativa privada ha construido gran cantidad de estanques y balsas, algunos de grandes dimensiones. La iniciativa pública, por su parte, lleva a cabo el Plan de Balsas del Norte de Tenerife, de acuerdo con el cual se están ejecutando un buen número de balsas de tamaño medio (entre 800.000 y 1.000.000 m<sup>3</sup> de capacidad), con las cuales se aprovecharán prácticamente los excedentes invernales de toda la vertiente Norte.

#### **V.3.4. Turismo.**

Desde finales del siglo XVIII se ha desarrollado, preferentemente entre las islas y los países europeos, una apreciable corriente turística. El interés inicial de los primeros viajeros (de tipo científico o paisajista), se vio modificado en la década de los 60, en la que comienza una gran expansión del turismo de masas.

De hecho, la economía de la isla ha sufrido una importante transformación, disminuyendo de forma característica las actividades agrarias para concentrarse de forma clave en el sector terciario. En consecuencia, una parte importante de la población se desplaza desde entonces de las medianías hacia la costa, donde comienza una actividad constructora incontrolada.

El tráfico total de viajeros a lo largo del año en la isla de Tenerife se sitúa en torno a los 5.297.085 pasajeros, según datos del Instituto Canario de Estadística para el año 1994, lo que

representa una proporción 1:8 con respecto a la población de la isla. De esta cantidad global, el 70% de la entrada de viajeros se realizó en este año a través del aeropuerto Reina Sofía, al sur de Tenerife, el 17% a través del aeropuerto de los Rodeos y el 13% restante a través de los distintos puertos de la isla.

Del total de viajeros, el 54% se corresponde con turismo procedente de países europeos, los cuales entran casi en su totalidad a través del aeropuerto Sur. De este conjunto, más de un 50% proceden del Reino Unido.

El 70% del turismo procedente de la península y Europa accede a la isla a través del aeropuerto Reina Sofía, mientras que los vuelos interinsulares se concentran en el aeropuerto de Los Rodeos. Mientras que el número de pasajeros procedentes de otros países o de la península representa una proporción mínima del total de la entrada de viajeros por puerto, esta cantidad se incrementa hasta representar aproximadamente el 40% de las comunicaciones interinsulares.

La llegada de viajeros se mantiene aproximadamente constante a lo largo de todo el año por cualquiera de las vías, con una media de pasajeros por trimestre de 900.000 en el aeropuerto Sur, 200.000 en el Norte y 140.000 por puerto.

## **VI. Implementación del Modelo Cartográfico**

## **VI. IMPLEMENTACION DEL MODELO CARTOGRAFICO**

Para completar el desarrollo de la metodología,- una vez establecidas las condiciones de implementación y conocidas las características del área de trabajo-, es necesario implementar el modelo cartográfico. Con el término de implementación se hace referencia al conjunto de operaciones que se deben llevar a cabo para construir la base de datos del GIS y desarrollar los módulos de proceso de datos que harán posible su funcionamiento.

La implementación del modelo cartográfico requiere la existencia de un software de base, especializado en la gestión de datos geográficos (en nuestro caso ILWIS), que permita el almacenamiento de las bases de datos que forman parte del modelo y que proporcione las capacidades de análisis espacial que se requieren para llevar a cabo las operaciones necesarias para el cálculo.

Como ya hemos indicado previamente, vamos a destinar el estudio piloto a la generación de escenarios comparativos de riesgo para manifestaciones de tipo efusivo básico en Tenerife a escala regional. Esta simplificación nos ha permitido centrarnos en la implementación de aquellas bases de datos, modelos físicos y operaciones necesarias exclusivamente para llevar a cabo el objeto de nuestro análisis.

En los siguientes apartados aparecen desarrollados los procedimientos que hemos seguido para generar la base de datos del GIS y, a continuación, se presentan los procesos de cálculo automático que hemos diseñado para la facilitar la generación reiterada de escenarios y su presentación gráfica. En último lugar, se presenta la estructura de la aplicación obtenida como resultado de la ejecución de estas tareas.

### **VI.1. Implementación de las bases de datos necesarias para la evaluación del riesgo.**

En ILWIS, las operaciones de análisis espacial se ejecutan sobre mapas en modo ráster, lo que, unido a las ventajas que representa la gestión de la información en este formato (véase capítulo III), nos ha decidido ha almacenar las bases de datos que forman parte del modelo cartográfico según este modelo.



Para que las operaciones de análisis espacial se puedan llevar a cabo, es necesario que todos los datos gráficos se sitúen en un marco de referencia común y que el tamaño del *píxel* sea el mismo para todos ellos.

Por este motivo, hemos referenciado los datos con respecto al sistema de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) tomando como origen el meridiano de Greenwich (algunos de los datos cartográficos de Canarias están referidos al meridiano de Madrid) y les hemos asignado un tamaño de píxel de 50 metros, lo que nos ha permitido llegar hasta un nivel de detalle en el análisis de 1:250.000.

La información de tipo alfanumérico asociada a las bases de datos gráficas, cuando existe, la hemos almacenado en forma de tablas con un formato ASCII estándar. Para que sea posible relacionar la información almacenada en éstas con los datos gráficos hemos establecido los nexos de conexión necesarios entre ambos tipos de datos.

ILWIS basa su funcionamiento sobre una estructura de base de datos de tipo relacional. Por ello, la forma en la que se ha establecido la conexión ha sido identificando en las columnas o *campos* de las tablas los valores que toman los atributos y en los *registros* o líneas la información correspondiente al código de mapa gráfico (valor digital) a que hacen referencia los atributos.

#### **VI.1.1. Bases de datos volcanológicas.**

Para generar la información necesaria sobre las características que presentan las manifestaciones de tipo efusivo básico en Tenerife, hemos analizado previamente: (1) las áreas fuente en las que pueden tener lugar cualquiera de los fenómenos que se presentan en la isla y (2) su distribución preferente en el espacio.

El primer análisis nos ha permitido establecer las zonas en las que con mayor probabilidad se desarrollarán erupciones en el futuro (e.d. el área probable de erupción) y el segundo nos ha servido para determinar las áreas en las que se han distribuido preferentemente los fenómenos objeto de estudio (e.d. la distribución de estilos eruptivos) .

Para la obtención de esta información hemos considerado la isla en su conjunto como un sistema volcánico, lo que nos ha permitido desarrollar procedimientos que tengan en cuenta el contexto espacial en el que se desarrollan los fenómenos volcánicos y que proporcionen a su vez información sobre las relaciones existentes entre ellos, evitándose de este modo la "parcialidad de enfoques" en la que se ha incurrido en estudios previos.

*a) Area Probable de erupción.*

Para el estudio del área probable de erupción hemos analizado la distribución de los centros emisores visibles pertenecientes a las series identificadas como III y IV en la cartografía MAGNA (escala 1:25.000) del Instituto Tecnológico y Geominero (figura 6.1).

El intervalo de tiempo que utilizan usualmente los estudios de riesgo para establecer las pautas de comportamiento que, en términos de peligrosidad, han tenido los fenómenos volcánicos varía de unas áreas volcánicas a otras y depende principalmente de las características y frecuencia con la que hayan tenido lugar las erupciones.

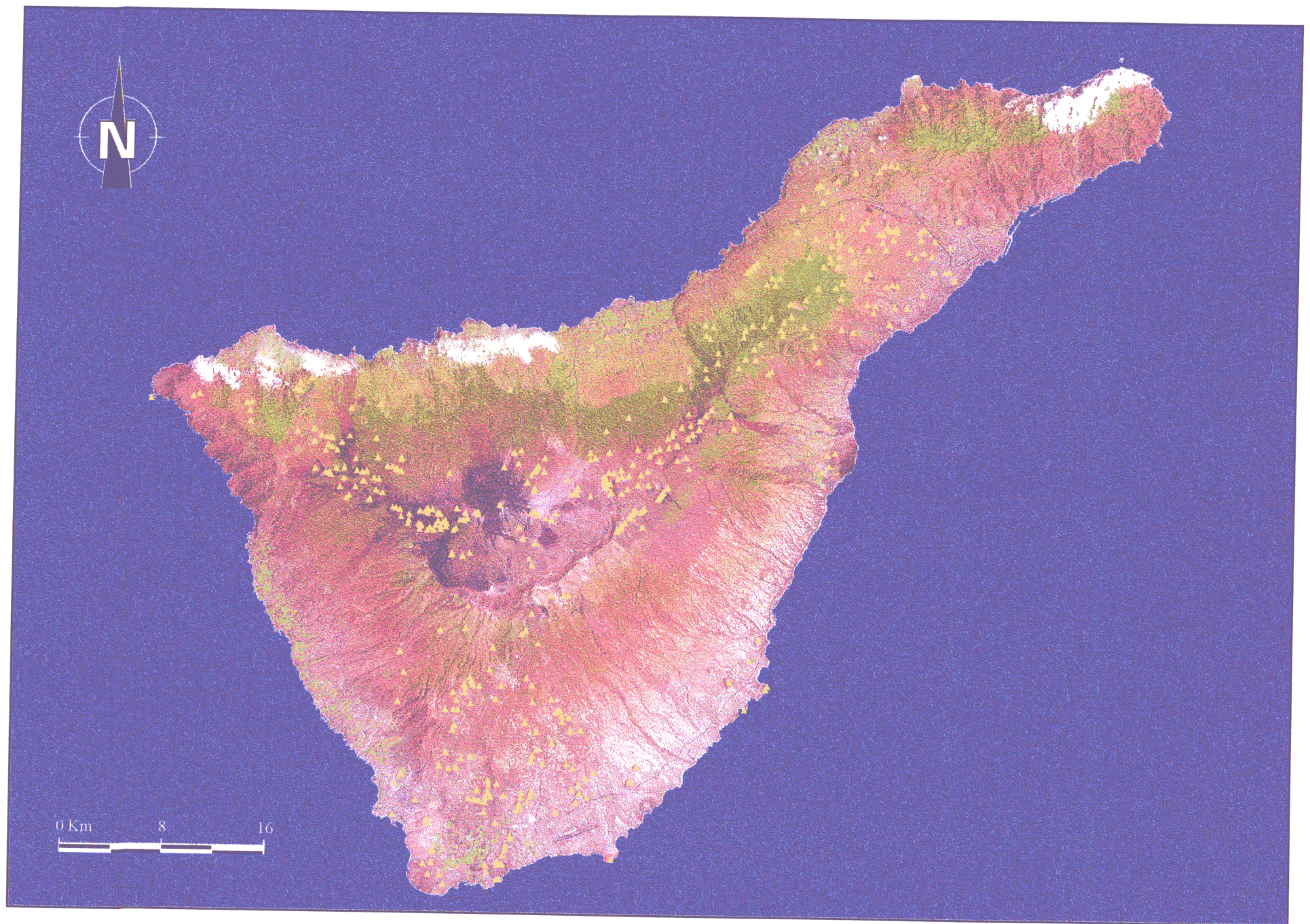
Por ejemplo, en los estudios llevados a cabo para evaluar el riesgo potencial en el Monte St. Helens, se analizó la totalidad del período de actividad de éste (40.000 años) aunque para la evaluación se consideró sólo el registro de los últimos 4.000 años (Crandell & Mullineaux, 1978). En contraste con este estudio, Miller (1989) analizó para la evaluación regional del riesgo en el Cascade Range (USA) el registro geológico de los últimos 100.000 años y otros autores estiman necesario analizar la historia eruptiva a lo largo de todo el período Cuaternario.

En nuestro caso, el criterio principal por el que se ha guiado la selección ha sido la necesidad de que el grado de conservación en el que se encuentran los centros y los productos emitidos por éstos sea lo suficientemente bueno como para poder llevar a cabo una identificación y localización correcta de los mismos.

El período de tiempo que abarcan las series III y IV varía de unos puntos a otros de la isla, pero supera en muchas áreas el pleistoceno superior, que es el que en mayor número de casos se fija como base para la realización de los estudios de riesgo.







**Figura 6.1.** Distribución de los centros de emisión visibles pertenecientes a las series III y IV (triángulos). Imagen base: composición Landsat 5 TM 5-4-3 (RGB).



Para realizar el análisis del área probable de erupción hemos introducido en el sistema las coordenadas del "*centro teórico*" que representa el punto principal de emisión identificado en la cartografía MAGNA y se ha comprobado su correcto posicionamiento haciendo uso de una composición en falso color (5-4-3 RGB) de una imagen del satélite Landsat 5 TM (*Thematic Mapper*), la cual hemos corregido geométricamente con anterioridad para que se ajuste a la malla geográfica de referencia elegida con un error medio menor del tamaño del píxel.

El número total de centros considerados es de 459, de los cuales 304 pertenecen a la serie III, 138 a la serie IV y 17 a erupciones históricas (tabla B1, Anexo B). Para estimar el área probable de erupción a partir de estos datos debemos primero establecer si la distribución de los centros obedece a algún tipo de patrón definido o es aleatoria.

Este análisis es necesario porque, si la distribución de los centros fuese aleatoria, significaría que las erupciones pueden tener lugar en cualquier punto de la isla y que, por lo tanto, el análisis del área probable de erupción no sería concluyente.

El análisis del patrón de distribución de los puntos se ha realizado aplicando dos métodos ampliamente utilizados: el del número de "vecinos reflexivos" (*reflexive nearest neighbours*) y el de la distancia media al vecino más proximo (*mean distance to nearest neighbour*).

El primer método, clasificado dentro lo que se conocen como *medidas de agrupamiento de poblaciones*, se utiliza para examinar las características que tiene cada uno de los puntos con respecto al resto de los que componen la población. Se definen como vecinos reflexivos de primer orden aquellos pares de puntos que cumplen la condición de ser los más próximos entre sí. Este concepto se extiende para identificar vecinos reflexivos de órdenes superiores (Boots & Getis, 1988).

Una forma simple de analizar la forma en la que se organizan los puntos es comparando el número de vecinos reflexivos existentes en la población objeto de estudio con el número que se obtiene cuando nos encontramos con una situación de aleatoriedad espacial completa (*Complete Spatial Randomness, CSR*), el cual se estima a partir de una serie de patrones pre-establecidos.

Si el número de vecinos reflexivos de orden superior resultante del análisis de la población es mayor al esperado en caso de aleatoriedad absoluta, la población se encuentra distribuida de acuerdo con un patrón regular. Si el número es inferior indica tendencia al agrupamiento y si es aproximadamente del mismo orden, la distribución es aleatoria.

En nuestro caso, los resultados obtenidos del análisis parecen indicar que el patrón de distribución es de tipo agrupado (tabla 6.1):

**Tabla 6.1.** Resultados del análisis de vecinos reflexivos.

Orden	Valor observado	Valor esperado en situación de aleatoriedad absoluta
1	272	285.27
2	138	151.06
3	106	111.58
4	66	92.49
5	62	80.78
6	46	72.61

El segundo método, que es complementario del anterior, pertenece a las denominadas *medidas de dispersión*, las cuales examinan las características de los puntos con respecto al área en que se distribuyen. El análisis consiste en este caso en medir las distancias existentes entre los vecinos más próximos de varios órdenes y compararlas con las que se encontrarían en una situación de aleatoriedad absoluta.

Si las distancias resultantes de este análisis son inferiores de las que presenta la distribución aleatoria, los puntos están agrupados, mientras que si son superiores el patrón de distribución es regular (Boot & Getis, 1988). Los resultados obtenidos al aplicar este método para la distribución de centros eruptivos son conformes con los que se han obtenido para las medidas de agrupamiento (tabla 6.2).

Debido a la falta de un test que permita establecer el nivel de significación de los resultados, el procedimiento que se utiliza comunmente para asegurar la corrección de la evaluación

consiste en generar una población distribuida de forma aleatoria y otra de forma regular, del mismo orden de magnitud que la nuestra, y comparar los resultados obtenidos al realizar estos análisis.

**Tabla 6.2.** Resultados del análisis de la distancia media al vecino más próximo.

Orden	Valor observado	Valor esperado en caso de aleatoreidad absoluta
1	661.87	1437.91
2	995.44	2156.87
3	1281.55	2696.09
4	1548.35	3145.29
5	1795.50	3538.71
6	2083.86	3892.43

Los resultados obtenidos siguiendo este procedimiento (tablas B2 a B5, Anexo B) indican que los valores observados por cualquiera de los dos métodos para la distribución aleatoria se aproximan bastante a los que proporciona el estimador y los de la regular superan claramente éstos, por lo que se puede concluir que, globalmente, los centros eruptivos en Tenerife no se distribuyen de forma aleatoria sino ocupando áreas preferentes, por lo que los resultados del cálculo del área probable de erupción pueden interpretarse como significativos.

Estos resultados están de acuerdo con las observaciones realizadas por distintos autores sobre la disposición preferente de los centros eruptivos en Tenerife (véase cap. II, Antecedentes).

La posición que adoptarán los centros de emisión en el futuro dependerá en primer lugar del campo de esfuerzos en profundidad y de la estructura de la isla. Si se asume que la no aleatoreidad de la distribución que presentan se deriva de la existencia de un entorno estocásticamente heterogéneo, se puede aplicar el denominado proceso Cox (Diggle & Milne, 1983) para formular matemáticamente la situación.

El proceso Cox asume que, en cada punto y en cada instante, hay un ratio intrínseco al que se producen erupciones, el cual se puede describir por medio de una función de intensidad.

La forma más simple de establecer la *intensidad de erupción* en cualquier punto  $x$  es calculando la suma ponderada con la distancia del número de erupciones en su entorno local.

La elección de la distancia que se va a utilizar como parámetro de ponderación varía de unos estudios a otros. En nuestro caso hemos utilizado como estimador la distancia media entre todos los centros seleccionados.

Para llevar a cabo el cálculo de la intensidad de erupción hemos rasterizado el fichero de centros indicando como "área de influencia" de cada uno de ellos la media de las distancias inter-centros (aprox. 2.500 m) y hemos contabilizado, para cada píxel que compone la imagen, el número de centros que ejercen influencia sobre el mismo.

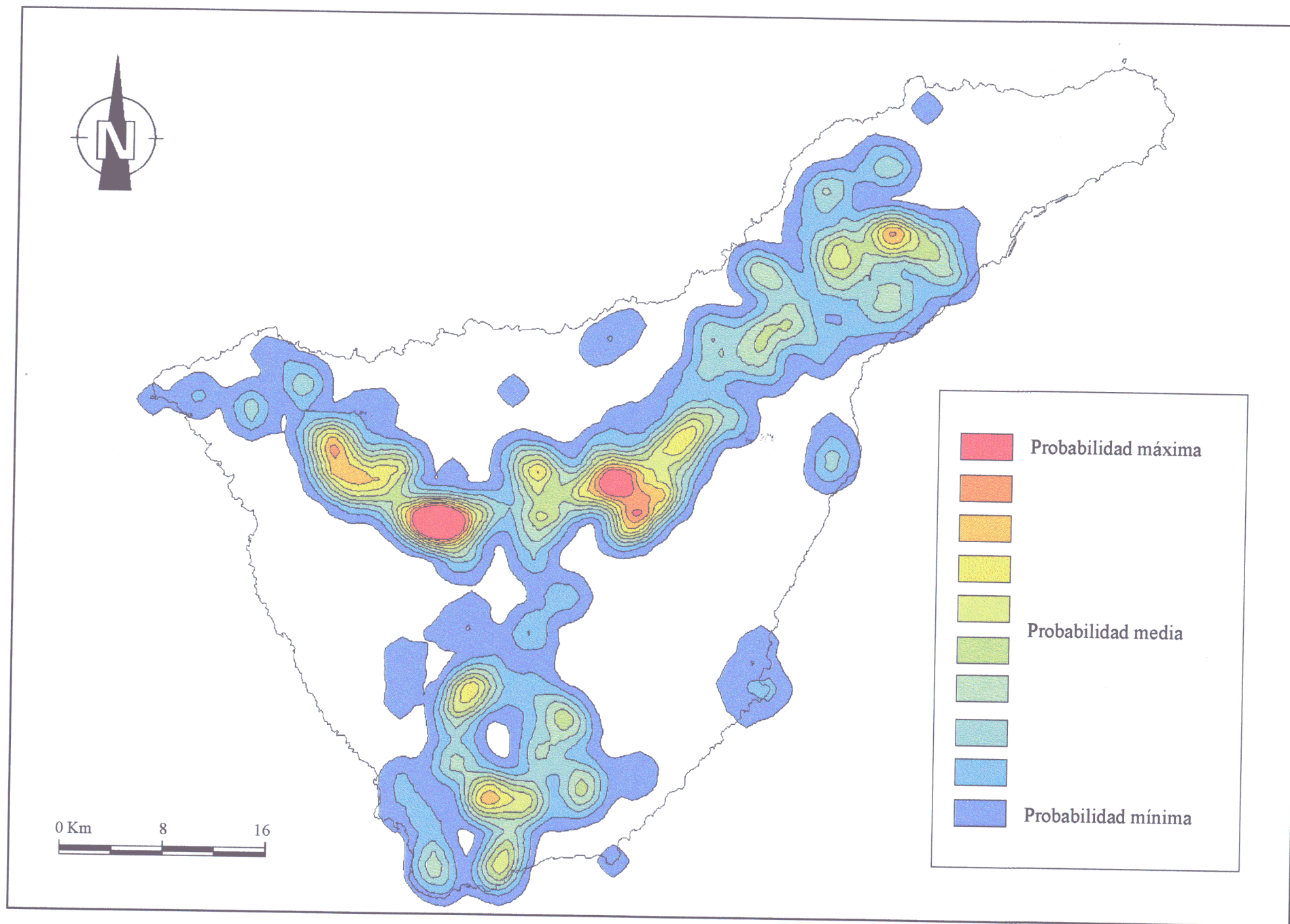
Para facilitar la interpretación de los resultados hemos aplicado un *filtro o algoritmo de medias locales*, con una ventana de trabajo equivalente al área de influencia, el cual produce un efecto de "suavizado" sobre la representación gráfica de los datos. Este filtro asigna como valor al píxel sobre el que se encuentra situado el resultado de calcular la media de los valores de todos los píxeles incluidos en la ventana de cálculo.

Esta serie de procesos ha generado como resultado una *superficie de probabilidad* en la que las áreas con mayor probabilidad de ocurrencia de erupciones son las que presentan una mayor concentración media de centros (figura 6.2).

#### *b) Tipología eruptiva y frecuencia relativa.*

Una vez obtenidas las áreas preferentes de erupción, el siguiente paso del estudio ha consistido en establecer la distribución de los estilos eruptivos principales que se presentan en la isla. Para ello, hemos utilizado como dato de partida la información disponible sobre la localización de los centros eruptivos utilizada en el apartado anterior.

Cada centro eruptivo seleccionado se ha asociado con el evento al que pertenece utilizando como referencia su posición en la cartografía MAGNA, la información generada por el proyecto Teide y las fuentes de datos bibliográficas disponibles. Para facilitar la interpretación de los datos, hemos establecido un orden cronológico aproximado para los eventos.



**Figura 6.2.** Localización potencial de futuros centros eruptivos en Tenerife. En valores intensos de rojo aparecen representadas las áreas más probables.



De cada evento identificado hemos analizado tres parámetros (Miller, 1989) que han permitido definir en términos generales la tipología eruptiva: composición, historia evolutiva y explosividad potencial. Esta información es fácil de adquirir analizando las características de los depósitos pertenecientes a cada evento (tabla B1, Anexo B).

Por lo que respecta a la composición, los eventos se han agrupado en torno a dos grandes categorías de acuerdo con la clasificación petrológica de sus productos: composición básica a intermedia y composición sálica.

En cuanto a la historia evolutiva, hemos hecho dos distinciones a la hora de clasificar los eventos. Se ha considerado por una parte el carácter monogenético o poligenético de las emisiones y, por otra, la relación espacial que presentan los eventos con respecto al complejo Teide-Pico Viejo. De esta forma, se han separado aquellos centros que se encuentran situados en el área de influencia del volcanismo central (utilizando como criterio su relación con el circo de Las Cañadas) de los que no presentan relación aparente con ella.

La explosividad potencial de los eventos se ha analizado a partir de sus productos. A nivel general, para clasificar los eventos hemos considerado que ésta aumenta con el grado de viscosidad de los magmas y que depende del carácter mono o poligenético de los eventos, lo que la convierte en una variable dependiente. La explosividad intrínseca de los eventos seleccionados se puede considerar, por lo general, como baja aunque ésta se ha visto incrementada ocasionalmente debido a la intervención de agua, por lo que hemos analizado la influencia de este factor por separado.

De acuerdo con estos criterios, el total de eventos analizados ha quedado clasificado dentro de cinco grandes categorías o tipologías eruptivas:

- 1) *Eventos efusivos básicos a intermedios, monogenéticos, relacionados con Teide-PV*
- 2) *Eventos efusivos básicos a intermedios, monogenéticos, sin relación con Teide-PV*
- 3) *Eventos efusivos a explosivos sálicos, monogenéticos, relacionados con Teide-PV*
- 4) *Eventos efusivos a explosivos sálicos, monogenéticos, sin relación con Teide-PV*
- 5) *Volcanismo central (complejo Teide-Pico Viejo).*

Una vez clasificados los eventos, para establecer el área en la que potencialmente puede desarrollarse cada una de las tipologías obtenidas, hemos aplicado un algoritmo de medias móviles con el que se ha interpolado la clasificación obtenida a la totalidad de la isla (figura 6.3).

Este algoritmo calcula, para cada punto del mapa, la media ponderada de los valores de todos los puntos situados dentro de una cierta *distancia límite* establecida, utilizando una función de ponderación. La fórmula que se ha aplicado para realizar este cálculo es del tipo:

$$Z = \sum_{i=1}^n (P_i \times Z_i) / \sum_{i=1}^n (P_i)$$

donde:

Z: valor de salida para el píxel sobre el que se realiza el cálculo

n: número de puntos

P<sub>i</sub>: peso del punto *i* (W es la función de peso)

Z<sub>i</sub>: valor en el punto *i*

Como distancia límite se ha utilizado, al igual que para el cálculo de la función de probabilidad, la media de las distancias inter-centros y como método de ponderación se ha aplicado una función exacta de tipo  $(1/d^n - 1)$  que toma los siguientes valores:

$$\text{para } D \leq d_0 \quad P = \frac{1}{(D / d_0)^n} - 1$$

$$\text{y para } D \geq d_0 \quad P = 0$$

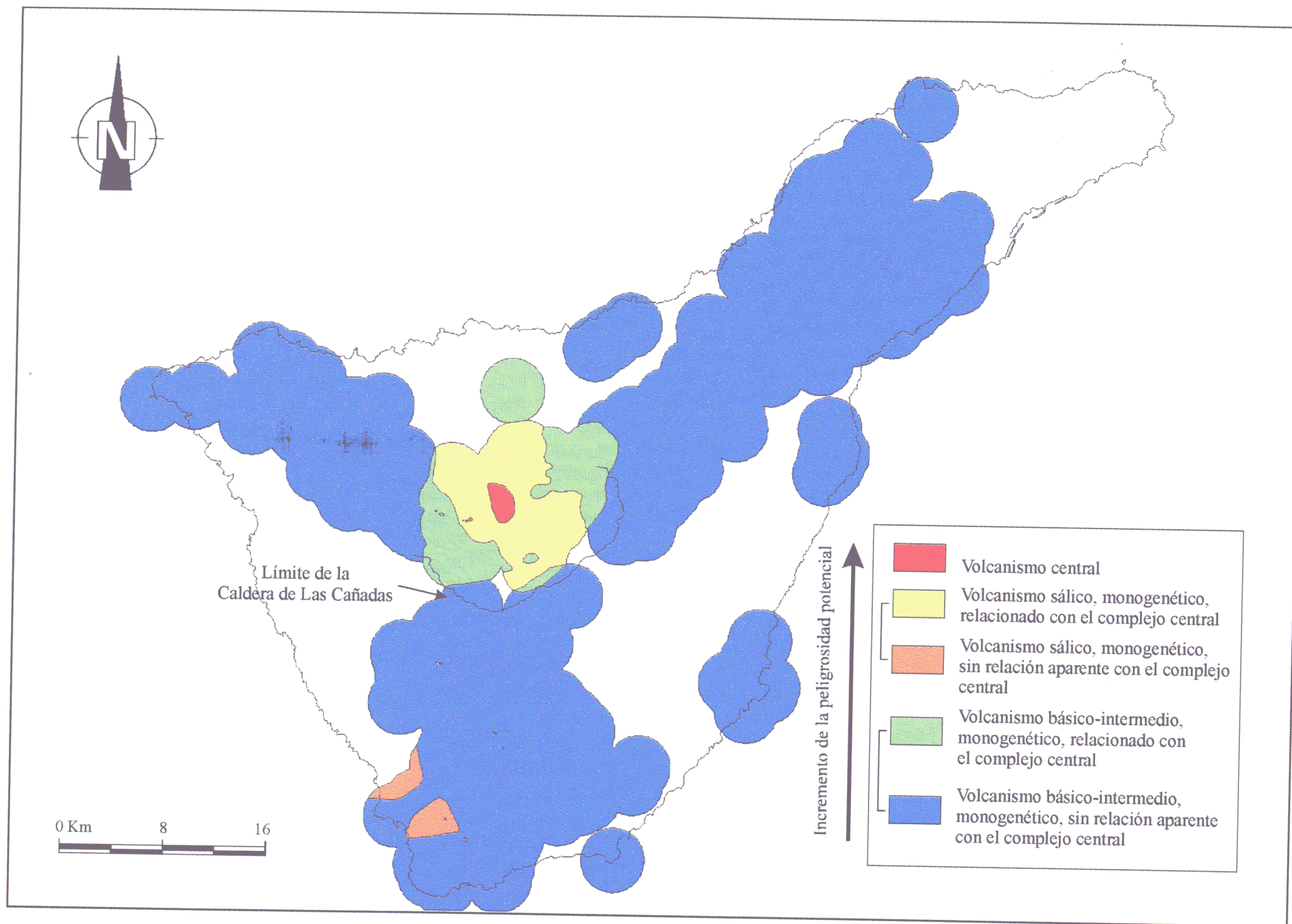
donde:

P: peso calculado

D: distancia al punto medido

d<sub>0</sub>: distancia límite

n: factor constante



**Figura 6.3.** Distribución de los estilos eruptivos identificados en Tenerife.

Esta función mantiene los valores de la clasificación en los píxeles sobre los que se encuentran situados los centros. Como valor para el coeficiente  $n$  hemos elegido 1 para obtener un resultado lo más suavizado posible en el mapa resultante, ya que nuestro interés se centra en obtener información a nivel regional.

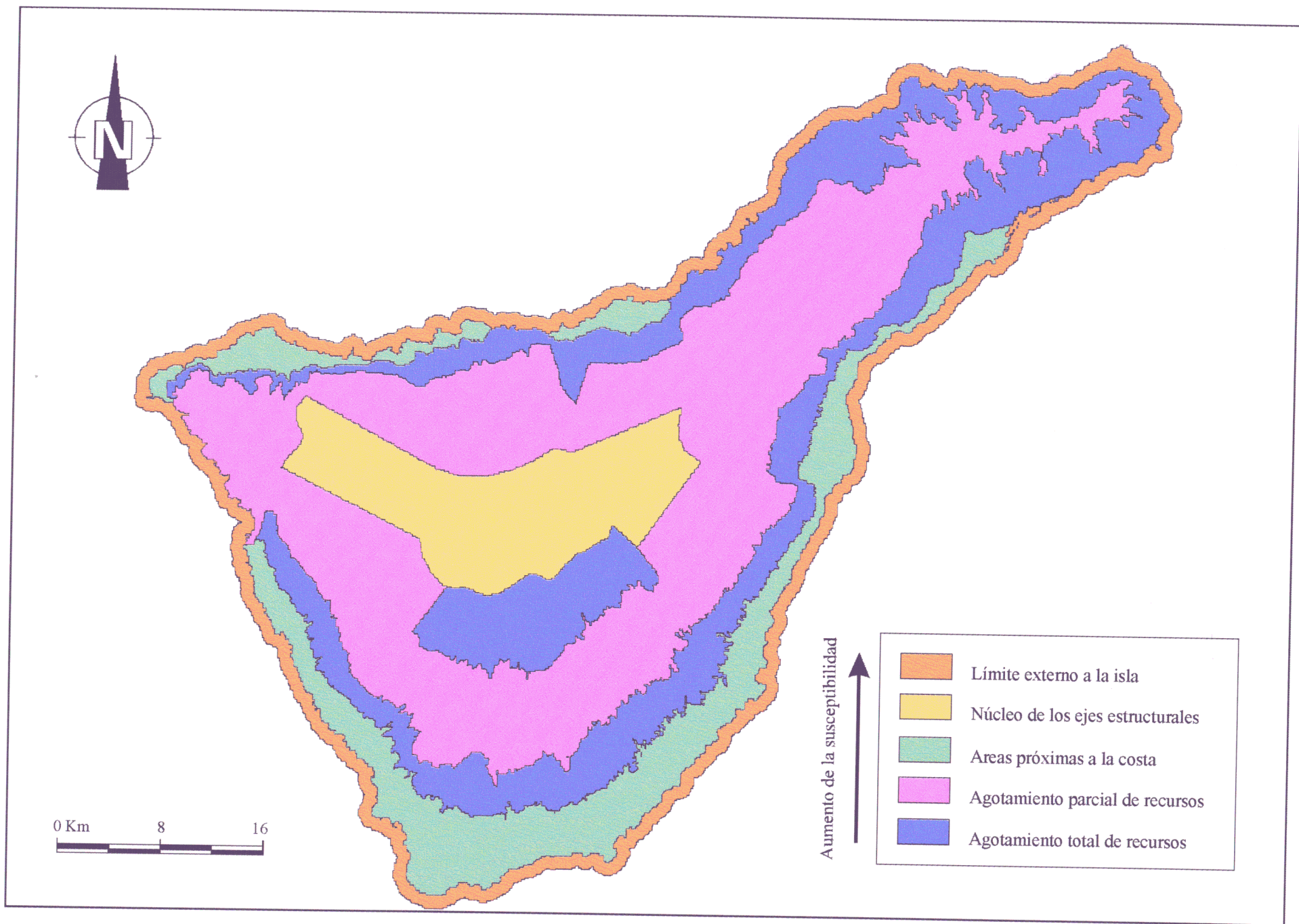
La frecuencia relativa de cada uno de los estilos identificados la hemos calculado estableciendo la proporción de centros pertenecientes a cada una de las clases. Los resultados obtenidos indican que las erupciones con mayor probabilidad de producirse en el futuro son las que pertenecen al tipo básico-intermedio, monogenético y localizadas fuera del área de influencia del complejo Teide-Pico Viejo (aprox. un 79 % del total). El resto de las categorías, de acuerdo con el orden en que las hemos presentado, tienen una frecuencia relativa de ocurrencia del 11, 7,5, 0,5 y 2 %.

Teniendo en cuenta que el intervalo de tiempo que abarca el estudio supera los 100.000 años en muchas áreas, la probabilidad en cualquier caso de que se produzca una erupción en un plazo próximo de tiempo es baja, aunque no se puede estimar con exactitud debido a la que no conocemos con precisión el valor de este intervalo en muchas zonas de la isla.

La posibilidad de intervención de agua en la erupción con el consecuente incremento de la explosividad que esto puede suponer, hace necesario conocer cuáles son las áreas susceptibles de que se presente este fenómeno. Por ello, a título indicativo, hemos analizado la relación que existe entre éstas y los estilos eruptivos identificados.

Para llevar a cabo este análisis, nos hemos basado en la zonación hidrogeológica elaborada por el Plan Hidrológico Insular del Cabildo de Tenerife, la cual hemos traducido en términos de susceptibilidad utilizando la información disponible sobre el estado de saturación de los acuíferos en cada una de las zonas que el Plan Hidrológico identifica.

Para contemplar la posibilidad de que se produzcan erupciones freáticas en las áreas costeras, hemos introducido un límite exterior de 1 Km en torno a la isla como área máxima de influencia en la que pueden tener lugar estas erupciones. En función de todas estas características, se distinguen cuatro zonas de susceptibilidad (figura 6.4):



**Figura 6.4.** Clasificación en zonas de susceptibilidad a la intervención de agua.

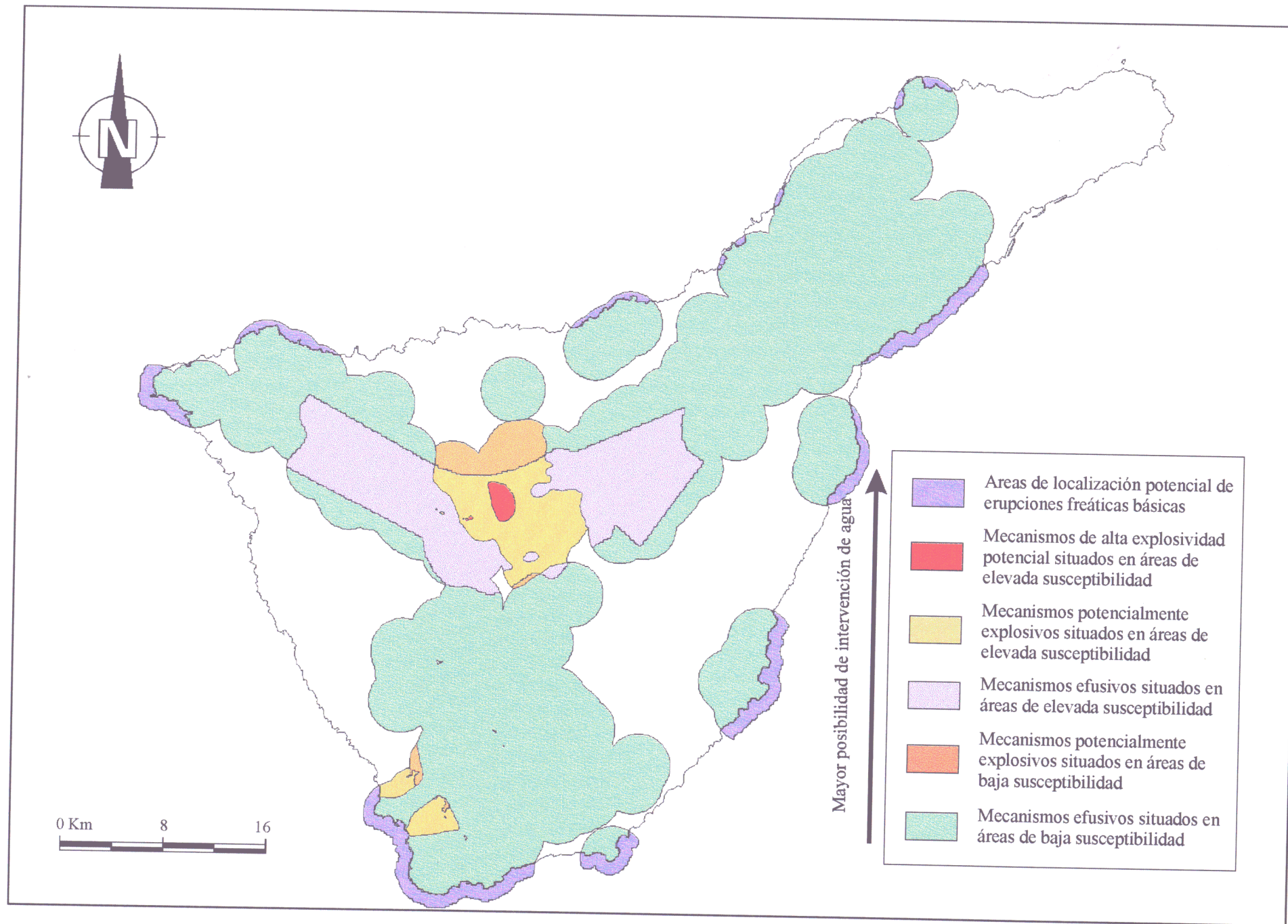


- Núcleo de los ejes estructurales: son zonas donde existe un elevado volumen de reservas y la superficie freática está sobre-elevada, lo que hace que la zona saturada se sitúe muy próxima a la superficie topográfica.
- Areas con agotamiento paulatino de los acuíferos: corresponde al macizo de Tigaiga, grandes áreas de la vertiente sur de la isla y la mayor parte de las vertientes de las Dorsales.
- Areas próximas a la costa: la superficie freática se encuentra a poca profundidad y no está controlada por el nivel del mar, lo que permite una mayor acumulación de reservas en la franja litoral, siempre que la costa no sea acantilada.
- Límite externo a la isla de 1.000 metros (erupciones en el mar).

El mapa que representa la distribución de las tipologías eruptivas existentes en la isla incluye de forma implícita información sobre el grado de explosividad potencial máximo que puede adoptar cada una de ellas. De acuerdo con esto, podemos identificar tres tipos de mecanismos predominantes: efusivos, explosivos y de alta explosividad.

Al analizar la relación existente entre las áreas susceptibles a la intervención de agua en la erupción y la distribución espacial de estos mecanismos hemos obtenido la localización de las zonas en las que cada uno de los mecanismos puede ver incrementada su explosividad potencial debido a la intervención de agua (figura 6.5). Este dato es relevante porque permite conocer la localización de las áreas en las que pueden tener lugar erupciones de tipo freático a freatomagmático.

Según la distribución obtenida, las zonas donde predominan las erupciones de tipo efusivo básico pueden verse afectadas por la intervención de agua en el área correspondiente al núcleo de los ejes estructurales y en toda la franja costera. En este tipo de erupciones sólo en el segundo de los casos el volumen de agua que puede intervenir en la erupción es lo bastante significativo como para incrementar de forma importante el grado de explosividad. En el primer caso, salvo alguna excepción, la intervención de agua no va a alterar la evolución de los fenómenos de forma importante.



**Figura 6.5.** Clasificación de estilos eruptivos en función de su susceptibilidad a la intervención de agua.

Si nos ajustamos al primero de los casos, las manifestaciones de este tipo en Tenerife se han caracterizado, prácticamente siempre, por la generación de conos piroclásticos de pequeña envergadura con coladas de lava asociadas. Las emisiones que han tenido lugar pertenecen a dos tipos principales: centros monogenéticos aislados y erupciones fisurales.

El área que se puede ver afectada por la emisión de productos piroclásticos suele ser de reducidas dimensiones y depende principalmente de la dirección y velocidad de los vientos, aunque comunmente se acumulan en la proximidad de los centros eruptivos. La misma distribución reducida presentan los proyectiles en caída balística.

Sin duda, el factor de riesgo más significativo de este estilo es la emisión de coladas lávicas. Aunque en las erupciones históricas el volumen y extensión de materiales no ha sido muy importante, las fuertes pendientes de la isla y el carácter fluido de los materiales han favorecido grandes desplazamientos que, en numerosas ocasiones (de acuerdo con el registro geológico), han llegado hasta al mar e incluso le han ganado terreno.

#### **VI.1.2. Bases de datos del medio físico.**

El hecho de que, de los tres factores de riesgo asociados con las manifestaciones efusivas básicas, el más significativo y que produce efectos de mayor consideración sea la emisión de coladas de lava, ha motivado que sea éste sobre el que hayamos centrado el desarrollo de los modelos físicos de erupción.

Los modelos utilizados, como se verá más adelante en este capítulo, requieren como único elemento para ejecutar los cálculos la topografía de la isla, la cual hemos expresado en forma de Modelo de Elevación Digital (DEM). En este modelo, cada píxel o unidad de superficie representa la altitud media del terreno en ese área.

Para generar el DEM de Tenerife hemos utilizado como datos de partida las curvas de nivel digitalizadas a partir del Mapa Topográfico Nacional a escala 1:100.000. La información digitalizada se corresponde con las líneas maestras, las cuales presentan un espaciado de 100 metros. Esta discretización ha proporcionado un conocimiento suficiente de las características de la topografía, dada la escala de trabajo y lo abrupto del terreno de la isla.



Las curvas de nivel se han almacenado en el sistema en modo vectorial utilizando pares de coordenadas UTM para localizar cada uno de los puntos que las definen. Para que la información topográfica adopte el formato del resto de las bases de datos, se ha rasterizado con un tamaño de píxel de 50 metros.

El mapa resultante de este proceso contiene información sobre la elevación del terreno en los "puntos" sobre los que se sitúa una curva. Para obtener el DEM de la isla (figura 6.6), se ha llevado a cabo un proceso de interpolación espacial en el que el valor de elevación de cada píxel se calcula mediante un algoritmo que calcula la media ponderada de los valores de las curvas entre las que se sitúa utilizando como factores de calibrado la media de las distancias euclídeas entre esas dos curvas. Este proceso se denomina *transformada de distancia de Borgefors* (Gorte & Koolhoven, 1990).

### VI.1.3. Bases de datos socioeconómicas.

Para completar la implementación de las bases de datos que utiliza el modelo cartográfico hemos introducido en el GIS la información necesaria para caracterizar el valor de los elementos bajo riesgo. Las bases de datos seleccionadas para este propósito son las siguientes:

#### *a) Términos municipales, núcleos urbanos y estadísticas de población.*

Los términos municipales de Tenerife se han digitalizado a partir de los límites trazados en el Mapa Topográfico Nacional a escala 1:50.000. Cada uno de los términos se ha identificado teniendo en cuenta el código que les asigna el Instituto Nacional de Estadística (INE) y se han rasterizado con respecto al resto de bases de datos.

En cuanto a los núcleos urbanos, la información correspondiente a los mismos se ha incorporado a partir de los ficheros digitales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) pertenecientes a la BCN200 (Base Cartográfica Numérica 1:200.000), donde cada núcleo aparece identificado gráficamente por el polígono que demarca su perímetro. Al igual que para los términos, hemos identificado cada núcleo con un código numérico exclusivo equivalente al que presentan en la BCN200 y este fichero se ha rasterizado.

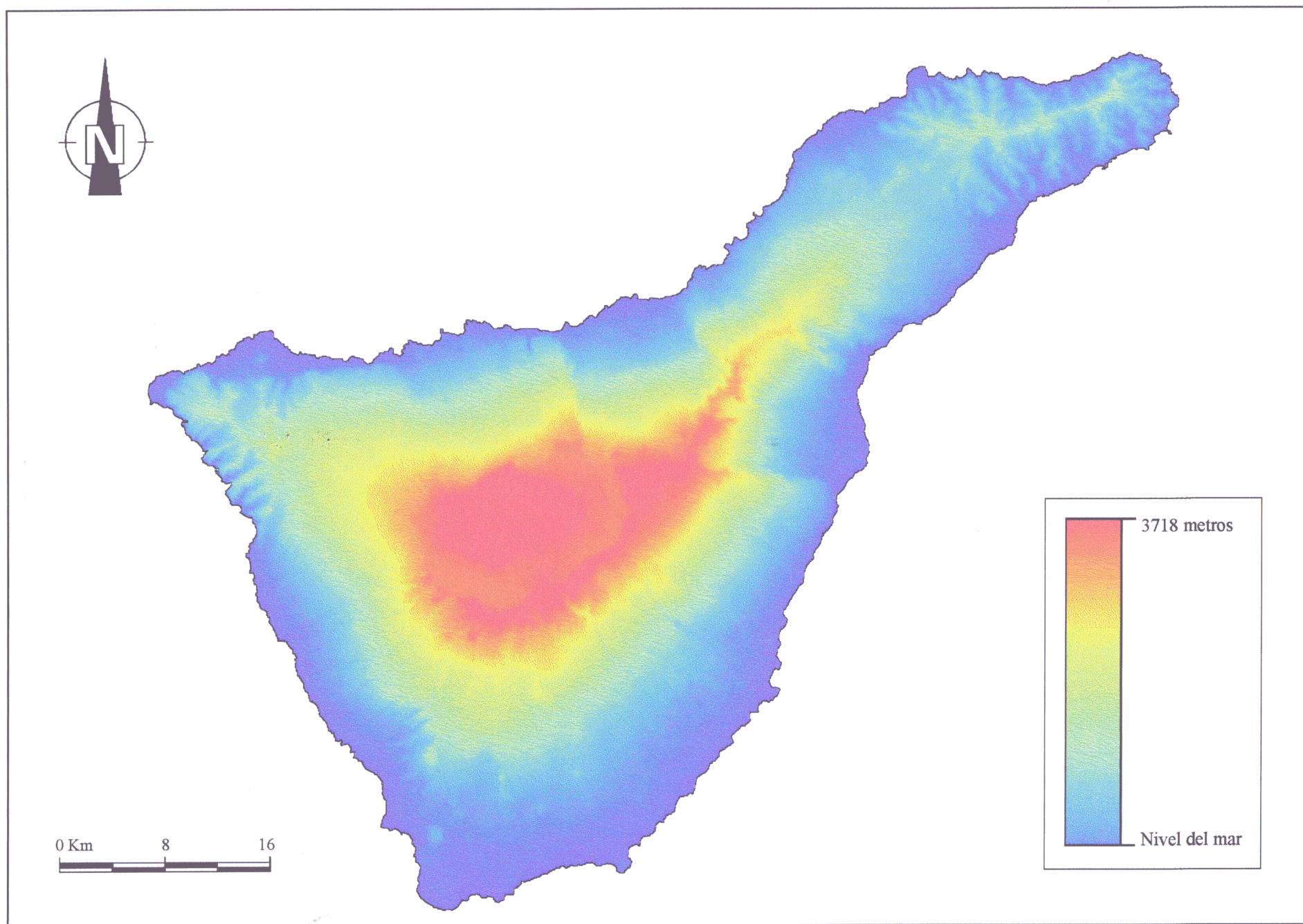


Figura 6.6. Modelo de elevación digital de Tenerife.

Los datos de tipo estadístico necesarios para llevar a cabo la evaluación del riesgo se han almacenado en tablas. Estos datos proceden de las estadísticas para el año 1994 sobre el número de viviendas y nivel de ocupación de las mismas en la práctica totalidad de los núcleos urbanos de la isla (Instituto Canario de Estadística) y se han estructurado de acuerdo con el formato indicado al inicio de este capítulo (tabla B6, Anexo B).

*b) Redes de comunicación viaria.*

Las carreteras de la isla se han digitalizado a partir del MTN 1:50.000 y posteriormente se han rasterizado siguiendo el mismo procedimiento que en los casos anteriores. Las carreteras se han identificado utilizando un código numérico compuesto que proporciona información sobre la titularidad de las mismas, su categoría y su número en la red.

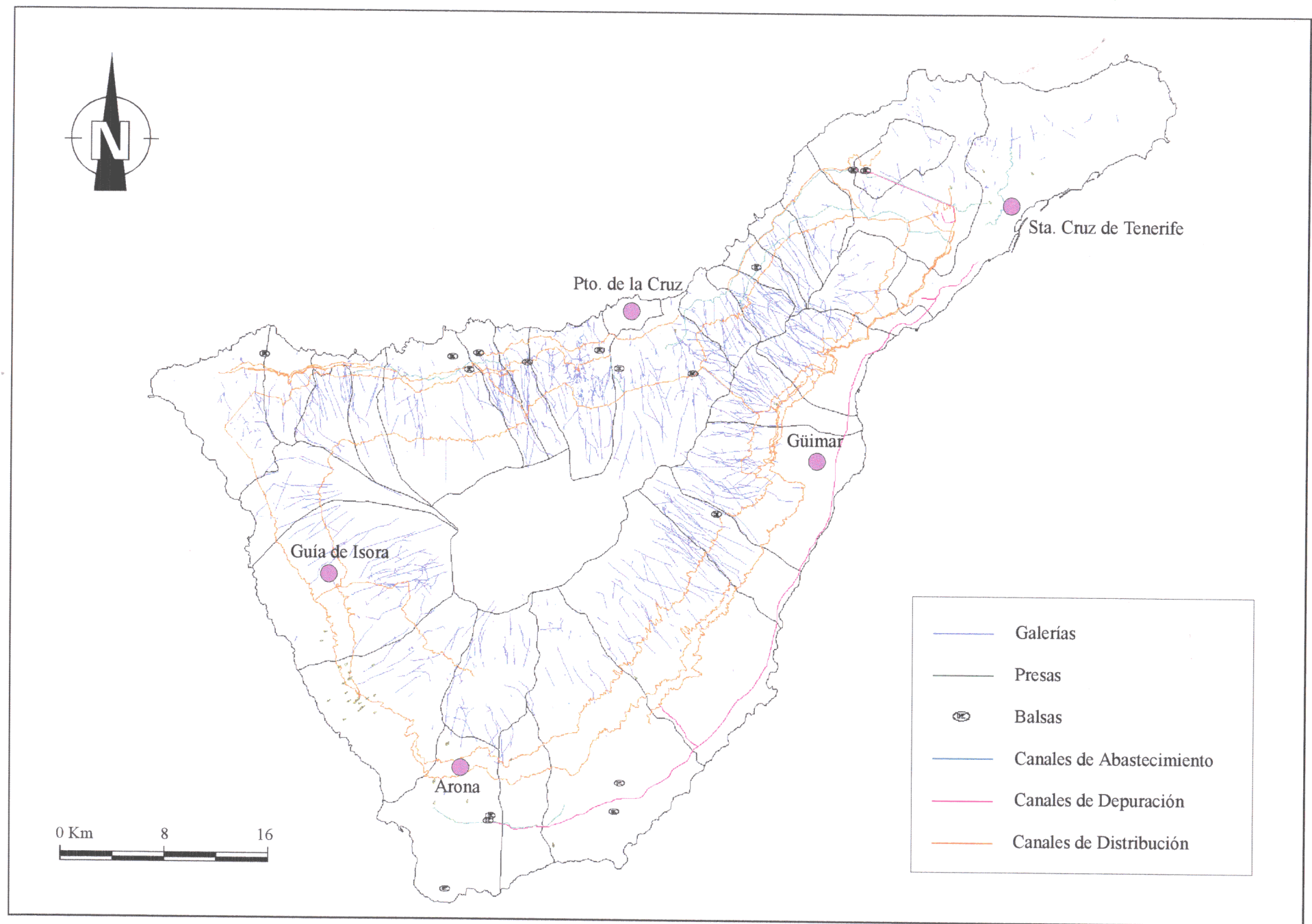
Este código aparece reflejado en una tabla asociada que se ha creado para establecer la conexión entre el código asignado y el nombre en clave de cada una de ellas (según el mapa de carreteras del Gobierno Autónomo de Canarias) (tabla B7, Anexo B).

*c) Redes de distribución de agua.*

Como hemos visto en el capítulo dedicado al estudio de las características de la isla, Tenerife está surcada por una densa red de galerías de las que se extrae un elevado porcentaje del agua utilizada en la isla.

El Plan Hidrológico Insular del Cabildo Insular de Tenerife está elaborando una base de datos digital que incluye información sobre la distribución de las mismas, de los canales principales de distribución de agua y de las presas y balsas entre otros, la cual ha puesto a disposición del proyecto Teide (figura 6.7).

Esta información, aunque ha sido incorporada al sistema, ha resultado útil sólo a efectos de presentación gráfica, puesto que no se disponía de los datos correspondientes a la identificación de cada uno de los elementos digitales. Por este motivo no se ha utilizado en los cálculos.



**Figura 6.7.** Localización de las galerías, canales principales de distribución, presas y balsas (fuente: Plan Hidrológico Insular, Cabildo de Tenerife).

*d) Elementos estratégicos.*

Para completar la información sobre los bienes y propiedades hemos introducido en el sistema datos sobre algunos elementos estratégicos. Estos se han agrupado de acuerdo con la categoría o tipo a la que pertenecen y son los siguientes (tabla B8, Anexo B):

- Aeropuertos y puertos
- Hospitales y centros de salud
- Establecimientos colectivos (hoteles, escuelas, centros municipales...)
- Estaciones de servicio
- Estaciones de radio o TV y repetidores de comunicaciones

Para la realización del estudio piloto hemos considerado suficiente integrar en la base de datos exclusivamente la localización de cada uno de estos elementos aunque, posteriormente, será posible añadir aquellas características que se deseen reflejar de cada uno de ellos.

*e) Agricultura.*

Para representar los usos y aprovechamientos de la isla hemos utilizado el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos a escala 1:200.000 de la provincia de Tenerife (MAPA, 1988), del que hemos digitalizado y rasterizado el área correspondiente a la isla siguiendo el mismo proceso que en los casos anteriores.

**VI.1.4. Vulnerabilidad.**

Los efectos directos más perjudiciales derivados de la acción de coladas lávicas se producen por la destrucción total por enterramiento, impacto o ignición de cualquier elemento que se encuentre en su trayectoria.

El riesgo para la población es muy bajo y, salvo excepciones (como el desbordamiento del lago cratérico del Nyiragongo), estos fenómenos no producen la pérdida de vidas humanas por acción directa. Esto se debe a su baja velocidad de dispersión que, para las lavas básicas, es del orden de pocos Km/h. Por este motivo tampoco resultan una amenaza grave para

cualquier tipo de maquinaria móvil.

Estas características se traducen en que la vulnerabilidad por efecto directo de las lavas sobre la población se sitúa en torno al 0%, mientras que la de los demás elementos incluidos en la base de datos es del 100% (carreteras, usos del suelo, canales de conducción, etc.).

En cuanto a los efectos indirectos que pueden derivarse de la interacción de los elementos bajo riesgo con las coladas destacan los incendios, ya que pueden extender los efectos catastróficos a zonas bastante alejadas del área por la que fluyen.

Las lavas también funden la nieve y el hielo y pueden provocar avalanchas y avenidas. Sin embargo, debido a que la mezcla no se produce de forma turbulenta, la magnitud de estos efectos suele ser bastante reducida.

También, debido a que las lavas tienden a circular por los fondos de valles, pueden llegar a obstruirlos y retener el agua que por ellos vierta, produciendo como consecuencia la anegación de las áreas inmediatas.

Por último, la desgasificación que puede producirse de forma repentina en las coladas puede liberar gases altamente tóxicos, aunque su área de influencia suele ser reducida.

## **VI.2. Implementación de las operaciones necesarias para la evaluación del riesgo.**

Los tres procesos o pasos principales que, para llevar a cabo la evaluación del riesgo, hemos distinguido en el diseño del modelo cartográfico, se han traducido en la fase de implementación como módulos independientes de cálculo dedicados a: extraer los parámetros de peligrosidad y probabilidad de erupción, generar los escenarios de riesgo y estimar el riesgo potencial.

### **VI.2.1. Extracción de parámetros de simulación.**

Para extraer los parámetros de simulación, hemos utilizado como base el programa para la lectura de la información de mapas implementado ya en ILWIS.

Este programa utiliza el principio de superposición de mapas en un GIS según el cual, si todas las bases de datos están referenciadas a un marco común, es posible extraer la información que se desee de cada una de ellas de forma simultánea. Las características de los atributos ligados a estos mapas que se hayan almacenado en tablas se pueden obtener por el mismo procedimiento.

Para obtener la información correspondiente a la tipología eruptiva más probable en el punto que se seleccione para realizar la simulación y conocer la probabilidad de erupción en ese punto hemos diseñado un procedimiento automático de captura de datos.

El programa de lectura de información de ILWIS requiere que se despliegue un *mapa base* en la pantalla que proporcione el marco geográfico. Para ello hemos seleccionado el mapa de estilos eruptivos sobre el que, para evitar posibles confusiones, hemos resaltado las áreas en las que potencialmente pueden tener lugar los fenómenos que nos interesan.

El programa de lectura de datos permite al usuario obtener información sobre las coordenadas UTM de cada uno de los píxeles sobre los que se posiciona. Simultáneamente, el programa proporciona información sobre la probabilidad de erupción en ese punto y su altitud (que se extrae a partir del mapa de área probable de erupción y del modelo de elevación digital respectivamente), lo que permite conocer las características del punto que se seleccione para llevar a cabo la simulación.

#### **VI.2.2. Generación de escenarios de riesgo.**

La importancia mayor de las coladas lávicas de entre todos los fenómenos asociados con el volcanismo monogenético nos han motivado a implementar en el GIS modelos que sean capaces de reproducir su comportamiento en la isla.

El desarrollo de un flujo de lava depende de múltiples factores. Entre ellos, los principales son el volumen y ritmo de emisión, las características reológicas del magma y la topografía (Hulme, 1974; Dobran et al., 1990). A lo largo del desarrollo de un flujo de lava pueden tener lugar los siguientes fenómenos:

- a) Comportamiento no newtoniano del fluido.
- b) Pérdida de calor por conducción, radiación y convección.
- c) Transiciones entre diferentes regímenes de flujo.
- d) Solidificación de la parte superior de la colada y formación de labios y túneles.
- e) Cambios en la topografía original durante el flujo.
- f) Bifurcaciones del flujo.

Hoy en día no existe un modelo físico que sea capaz de simular todos estos fenómenos, describiendo conjuntamente sólo tres de ellos como máximo. Los modelos existentes son de muy diversa índole según el modo de aproximación al problema y abarcan desde los que resuelven las ecuaciones de transporte a probabilísticos, desde analíticos a empíricos.

Los modelos más empleados en riesgo volcánico son los probabilísticos, los cuales se utilizan comunmente para la generación de mapas de peligrosidad y para el seguimiento y actuación en caso de crisis (Barberi et al., 1993). Un modelo sencillo que puede emplearse para la generación de mapas de peligrosidad para erupciones efusivas es el *modelo de máxima pendiente*, que es el que hemos utilizado en nuestro caso.

En éste modelo se asume que la topografía juega el papel principal en la determinación del camino seguido por la colada. El modelo requiere para su funcionamiento la existencia de un modelo digital de elevación de la zona de estudio y el conocimiento del punto que se ha seleccionado como emisor del flujo (Felpeto et al., 1996).

Desde el píxel que representa el punto emisor, se considera que el flujo puede extenderse hacia cualquiera de los vecinos que lo rodean. La probabilidad de que la colada se desplace hacia un píxel determinado es proporcional a la diferencia de alturas entre éste y el píxel en el que se encuentra situado, teniendo en cuenta que si la diferencia es negativa la probabilidad será cero, es decir, que la colada no puede propagarse en contra de la pendiente (figura 6.8).

Aplicando un algoritmo de Monte Carlo, el modelo calcula un posible camino para la colada. Este proceso se repite un gran número de veces y finalmente se hace un recuento de la cantidad de veces que cada píxel ha sido atravesado por la colada. Los píxeles que hayan sido atravesados muchas veces serán los que tengan una mayor probabilidad de ser invadidos.



Este procedimiento se enfrenta con un problema de difícil solución: en el cálculo no se tiene en cuenta a priori la distancia máxima que puede alcanzar la colada, por lo que si ésta entra en una zona llana el cálculo permanecerá retenido indefinidamente en ella y, en caso contrario, la longitud obtenida será infinita.

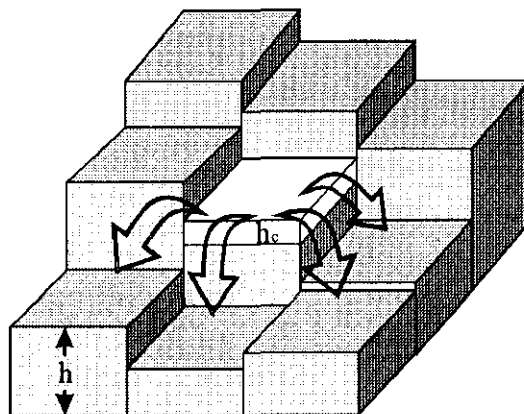


Figura 6.8. Representación esquemática del modelo de máxima pendiente.

Para evitar este efecto se ha introducido en el modelo un parámetro denominado *longitud máxima del flujo* ( $l_{\max}$ ), cuya misión es detener la colada cuando ha recorrido una distancia determinada (es decir, un número determinado de píxeles).

Otro parámetro que se ha considerado es la *altura crítica* ( $h_c$ ), que es un término que se suma a la altura de cada una de los píxeles que recorre el flujo. Este parámetro simula el efecto de la altura de la colada u otros efectos como la rugosidad del terreno en la celda. El modelo permite fijar también el número de iteraciones que se desee realizar.

El escenario de riesgo que se genera aplicando el modelo se almacena en dos ficheros: un fichero de imagen que se almacena en formato binario y otro de documentación en formato ASCII. El primero asigna a cada píxel implicado en el cálculo un valor o código relacionado con la probabilidad de que esté afectado por el fenómeno y el segundo incluye información sobre los parámetros que han intervenido en la simulación y las características del fichero de imagen (tabla B9, Anexo B).

Estos ficheros proporcionan la interfase para que sea posible encadenar los procesos de cálculo que tienen lugar en este módulo y los que se llevarán a cabo para la estimación del riesgo potencial que se deriva del escenario generado. La interfase entre este módulo y el de extracción de parámetros de riesgo no se ha establecido, por lo que la introducción de los datos en el modelo se realiza de forma manual.

### VI.2.3. *Estimación del riesgo potencial.*

Como hemos visto en el capítulo IV, el tipo de operaciones requeridas para obtener la estimación del riesgo potencial a partir del escenario de riesgo pertenecen principalmente a la categoría de funciones de análisis espacial. Estas operaciones se han implementado utilizando exclusivamente las herramientas existentes en ILWIS para este propósito.

Con el fin de evitar los procedimientos manuales, hemos aprovechado la capacidad de ILWIS para encadenar operaciones utilizando *ficheros de procesamiento por lotes* (ficheros batch), en los que hemos contemplado la forma y orden en los que debe tener lugar la interacción entre las bases de datos que intervienen en el proceso de evaluación.

En cada una de las fases que componen el proceso de estimación del riesgo (aptdo. IV.2.2) participan distintos tipos de información que se pueden clasificar de forma general como datos de partida, resultados parciales y resultados finales.

El primer grupo o categoría engloba al escenario de riesgo (que es a su vez el resultado final de los procedimientos anteriores), a las bases de datos socioeconómicas y a la vulnerabilidad. Dentro del segundo grupo están incluidos el valor expuesto y el riesgo específico y en el tercero el riesgo potencial y el total.

Para hacer comprensibles los procedimientos que se llevan a cabo de forma automática en la evaluación del riesgo potencial, hemos proporcionado a los ficheros de procesamiento por lotes la capacidad de representar gráficamente parte de la información que generan durante los cálculos. Para este propósito hemos seleccionado el escenario de riesgo, los mapas que informan sobre el valor expuesto y el mapa de riesgo potencial.

Son muchos los métodos mediante los cuales es posible expresar la información contenida o relativa a cada uno de estos mapas. La condición principal que debe cumplir cualquiera de ellos es que sea capaz de reflejar, de la forma más sencilla y clara posible, lo que se pretende mostrar y que incluya todas las claves necesarias para su interpretación, informando, en el caso de que sea oportuno, sobre los procedimientos que se han seguido para obtenerlo.

El mapa de peligrosidad o escenario de riesgo, según se obtiene como resultado del proceso de simulación, expresa exclusivamente las áreas que potencialmente se verán afectadas por los productos de la erupción.

Para su correcta interpretación, hemos programado la inclusión en los gráficos de algunos datos adicionales que permitan valorar la información que el mapa nos proporciona, sin que ello la enmascare. Los elementos básicos que se han seleccionado para la representación han sido los siguientes:

- 1) Contexto espacial en el que se distribuyen los productos (base topográfica).
- 2) Descripción del tipo de fenómeno representado (coladas lávicas en nuestro caso), incluidos los valores que han adoptado las variables utilizadas en el proceso de generación del mapa.
- 3) Leyenda interpretativa de los valores que el fenómeno representado adopta.
- 4) Localización del centro o los centros de emisión en relación con la probabilidad de erupción.

A título informativo hemos representado también en forma de mapas la información disponible sobre las características que adoptan los elementos bajo riesgo en la zona afectada por el fenómeno (información sobre el valor expuesto).

Para evitar que la interpretación se haga confusa, hemos utilizado dos mapas para este propósito. El primero de ellos se ha destinado a representar los datos sobre la red viaria, núcleos de población y elementos estratégicos existentes en el área cubierta por el escenario de riesgo en relación con la probabilidad de que se vean afectados por las coladas lávicas. El segundo ha tenido como propósito informar sobre los usos de suelo existentes en esa zona y la distribución de la red de distribución de agua.

En cuanto al riesgo potencial, la técnica mediante la que se expresan las áreas afectadas por el mismo grado de riesgo frente a un fenómeno determinado se denomina *microzonificación* (Alexander, 1993).

El mapa mediante el que se expresa esta microzonificación pertenecerá a distintos tipos dependiendo del número de peligros considerado y del número de elementos que va a representar (uso del mapa). Básicamente se distinguen mapas de peligro único y uso simple, peligro único y uso múltiple y peligro múltiple y uso múltiple.

De las tres categorías, la que resulta más apropiada para representar los resultados de la aplicación del modelo cartográfico es la de peligro único (puesto que sólo se ha tenido en cuenta un tipo de fenómeno en la simulación) y uso múltiple, ya que la evaluación se realiza simultáneamente para el conjunto de elementos bajo riesgo.

En este caso, como para el del escenario de riesgo, se ha decidido incorporar información en forma de leyendas explicativas de los resultados obtenidos. Como resultado de los procesos de análisis espacial, se obtiene información sobre el riesgo potencial también en forma de tablas que complementan y apoyan las representaciones gráficas.

### **VI.3. Estructura del sistema resultante de la implementación.**

Como resultado de la implementación del modelo cartográfico, la aplicación para el cálculo del riesgo en Tenerife ha quedado estructurada de la siguiente forma (figura 6.9):

- Un módulo de extracción de parámetros en el que intervienen el conjunto de bases de datos volcanológicas y del medio físico, las cuales se utilizan como apoyo en la selección del centro de emisión teórico y para el funcionamiento del módulo de simulación.
- Un módulo de generación de escenarios, del que forma parte fundamental el modelo físico de simulación y que produce como resultado un escenario de riesgo en función de los parámetros seleccionados para el cálculo.

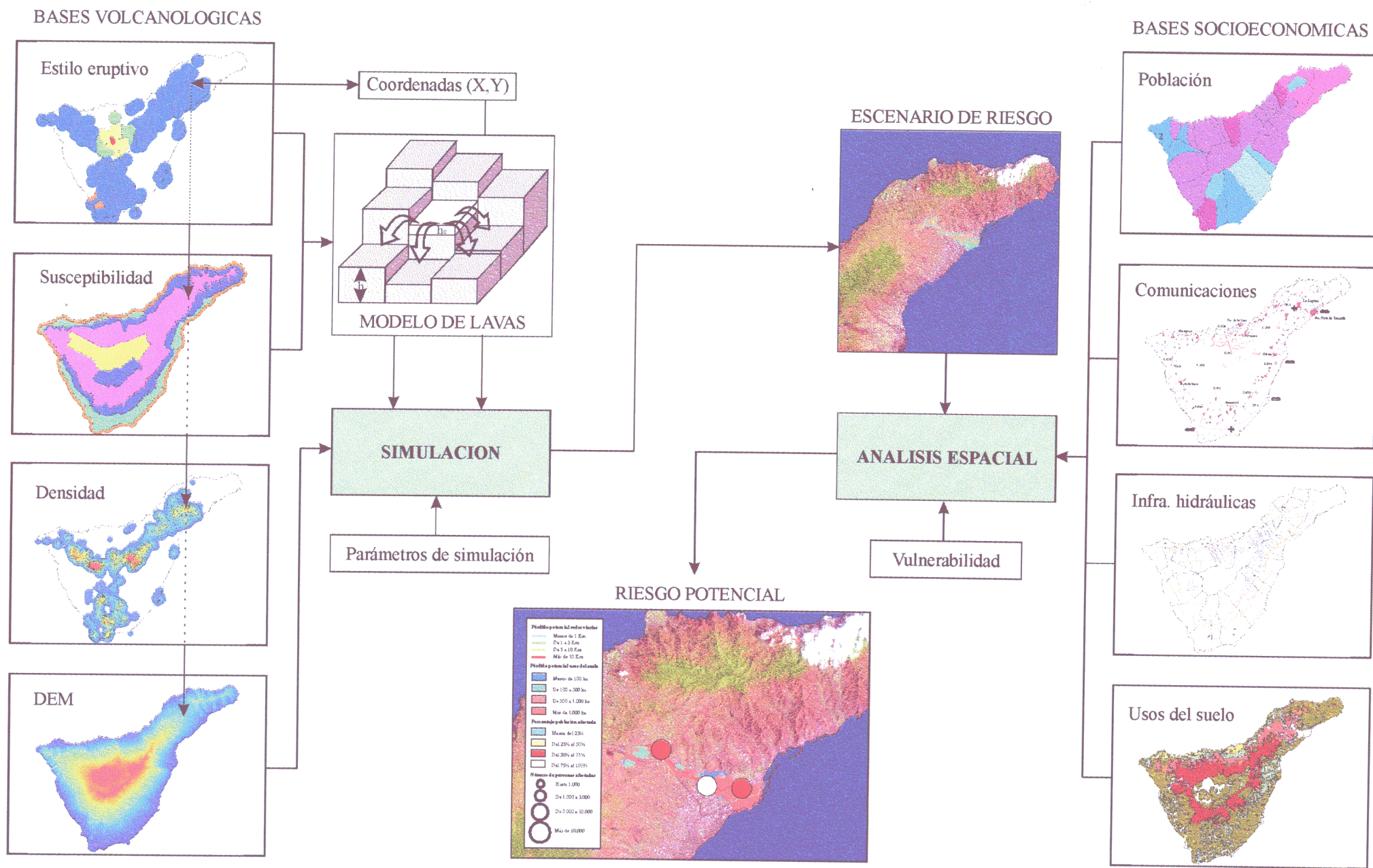


Figura 6.9. Estructura del sistema resultante de la implementación del modelo cartográfico en Tenerife.

- Un módulo de estimación del riesgo basado en operaciones de análisis espacial, el cual utiliza como entradas el escenario de riesgo, los datos socioeconómicos y la vulnerabilidad y que conduce a la obtención de un conjunto de mapas y tablas que proporcionan información sobre los resultados del cálculo.

## **VII. Evaluación del Riesgo frente a Coladas Lávikas**

## VII. EVALUACION DEL RIESGO FRENTE A COLADAS LAVICAS

Para llevar a cabo la evaluación del riesgo frente a coladas lávicas en Tenerife hemos seleccionado tres escenarios o "casos tipo" a los cuales hemos aplicado el modelo cartográfico implementado en el capítulo anterior.

Los escenarios se han seleccionado con el objeto de establecer un medio de comparación de los efectos que una crisis originada en distintos puntos de la isla podría provocar. Para todos ellos hemos considerado la hipótesis de máxima magnitud, según la cual los materiales podrían llegar a alcanzar las áreas costeras, es decir, hemos considerado el parámetro  $l_{max}$  del modelo como indefinido.

El número de iteraciones que hemos aplicado en el modelo para obtener la superficie potencialmente afectada por las lavas ha sido de 10.000 con el fin de obtener una mayor precisión en los resultados. En cuanto a la altura crítica, la hemos fijado en 2 metros, suficiente para tener en cuenta la potencia media de las coladas y la rugosidad del terreno.

El primero de los casos presenta los efectos que produciría una erupción con su origen en la Dorsal NW de la isla, aproximadamente en la línea de cumbres. En el segundo, hemos situado el centro emisor en las estribaciones de la Dorsal de La Esperanza. Los centros de emisión se han localizado en áreas de probabilidad elevada de erupción.

El tercer caso lo hemos situado en las laderas Sur de la isla, en una área de probabilidad media de ocurrencia. Este escenario, aunque menos probable, ha proporcionado datos interesantes sobre las consecuencias que se podrían derivar si tuviera lugar una erupción en el área donde existe un mayor número de alojamientos turísticos de Tenerife.

Para que quede representada la posibilidad de que se produzcan erupciones de tipo fisural, hemos contemplado ésta en el primero de los escenarios, donde se ha simulado una erupción con tres centros principales de emisión orientados según la dirección preferente en la que parecen haberse producido este tipo de erupciones en el área.



### VII.1. Caso I: Erupción fisural en la dorsal NW.

Para simular los efectos de una erupción de tipo fisural con su origen en el área de la dorsal NW hemos seleccionado tres centros que se han considerado como centros principales de emisión, localizados en las siguientes coordenadas:

Centro 1:	xUTM: 328.800	yUTM: 3.130.100	z: 1644 m.
Centro 2:	xUTM: 328.500	yUTM: 3.130.200	z: 1617 m.
Centro 3:	xUTM: 328.300	yUTM: 3.130.400	z: 1537 m.

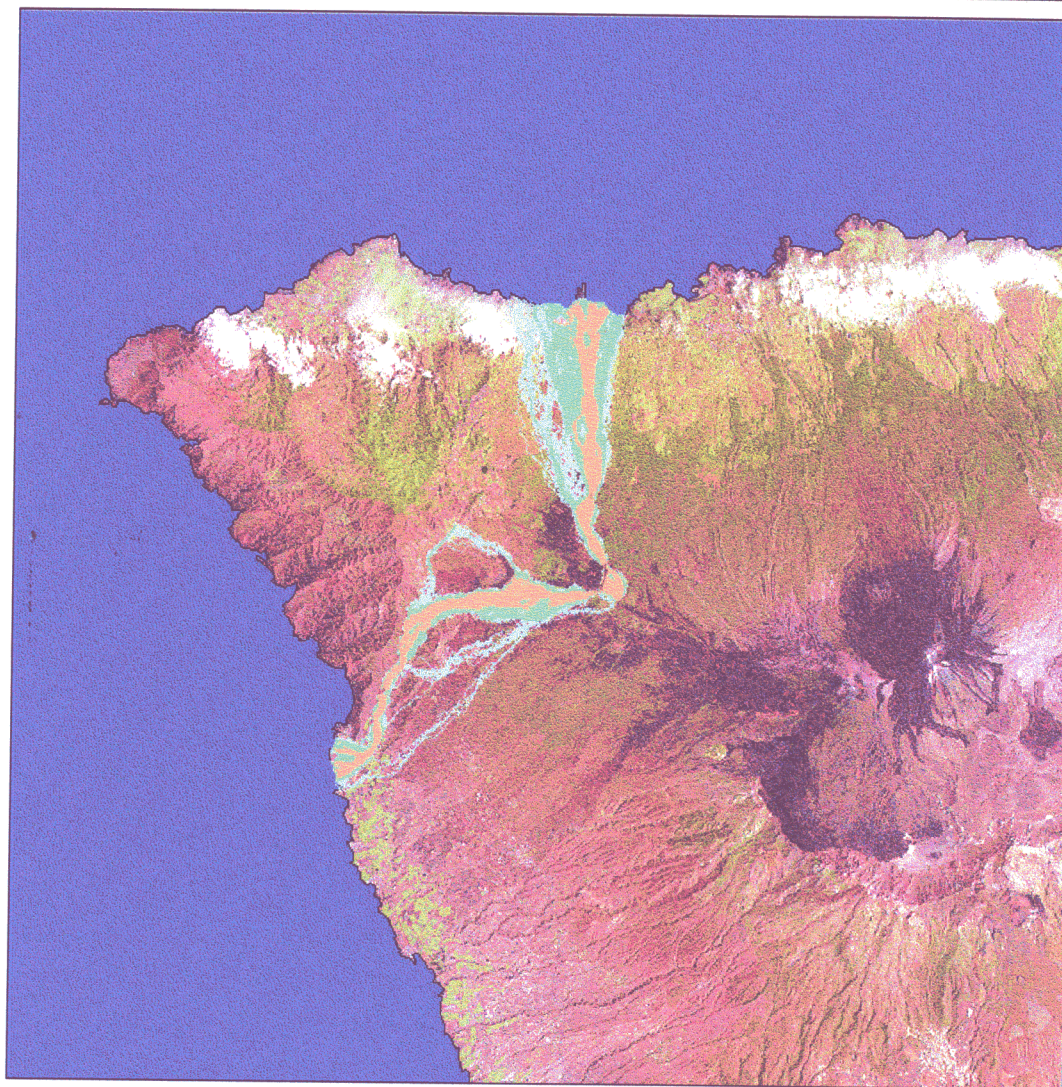
Las coordenadas elegidas representan una fisura de aproximadamente 583 metros de longitud, a lo largo de la cual se alinearían groseramente los centros según una dirección aproximada de N59W, presentando una diferencia máxima de altitud entre los extremos de 107 metros. Estos parámetros se han elegido debido a la similitud que presentan con los que han definido algunas de las erupciones históricas en la isla.

La posición de los centros se ha seleccionado teniendo en cuenta como condición principal que todos ellos se encuentren localizados en una zona donde la probabilidad de ocurrencia de erupciones sea, por lo menos, alta (figura 7.1). Siguiendo estos criterios y, aplicando los parámetros comunes de simulación especificados previamente, hemos obtenido como resultado un escenario de riesgo a partir del cual hemos llevado a cabo la evaluación de los efectos potenciales que esta erupción provocaría en su área de influencia.

En el escenario de riesgo (figura 7.1) se observa claramente que existen dos trayectorias principales por las que las lavas tenderían a discurrir, a las cuales el modelo ha asignado una probabilidad intermedia.

La localización de los centros de emisión en el área de cumbres favorece el hecho de que el flujo se pudiese desarrollar con igual facilidad hacia ambas vertientes de la dorsal aunque, aparentemente, las condiciones son más favorables en la vertiente Norte, ya que la pendiente es más pronunciada en este sentido, lo que se ve reflejado por la mayor continuidad de esta trayectoria desde el punto origen.

ESCENARIO DE RIESGO PARA COLADAS. CASO I: ERUPCION EN LA DORSAL NW



Probabilidad de trayectorias

Mínima

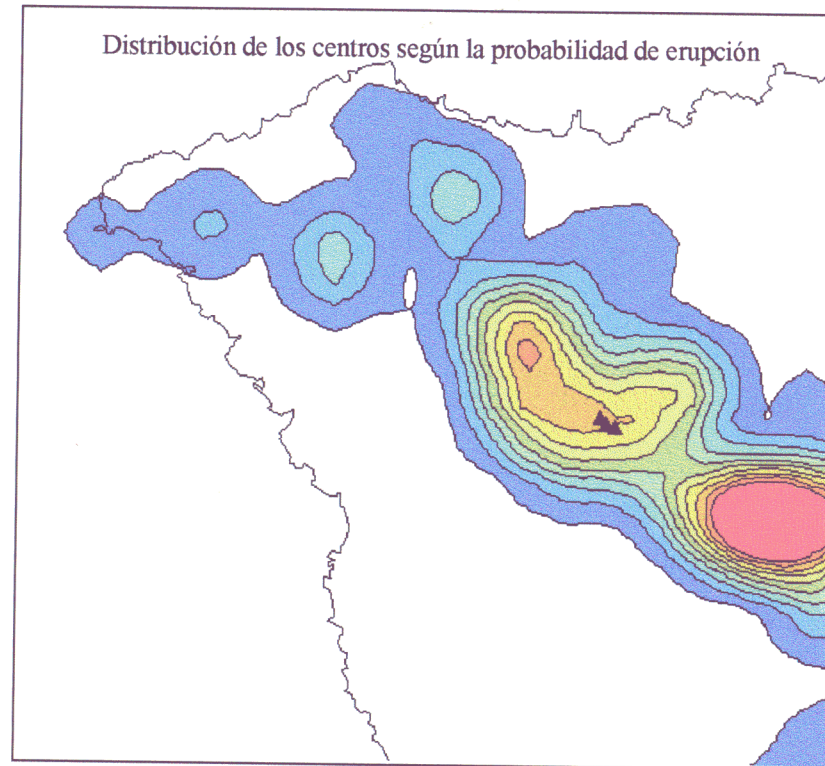
Baja

Media

Alta

Máxima

Distribución de los centros según la probabilidad de erupción



VARIABLES DE CALCULO:

**Coordenadas del centro:** xUTM: 328.800 yUTM: 3.130.100  
xUTM: 328.500 yUTM: 3.130.200  
xUTM: 328.300 yUTM: 3.130.400

**Longitud máxima:** Indefinida

**Altura crítica:** 2 metros

**Número de iteraciones:** 10.000

0 Km 5 10

**Figura 7.1.** Escenario de riesgo resultante de la aplicación del modelo para simular una erupción fisural en el área de cumbres de la dorsal NW.

La distancia máxima que alcanzan las lavas es del orden de 9 Km hacia el norte y de unos 15 Km hacia el SE. La existencia, tanto en el registro histórico como en el geológico, de coladas que han alcanzado la costa con su origen en puntos cercanos a este área, hace perfectamente factible esta situación. Conocidas las distancias, sería posible asignar un ratio medio de avance de las coladas y calcular sus tiempos de llegada a diversos puntos de interés.

En su trayectoria, la anchura máxima de la colada podría llegar a ser de hasta 1000 metros en algunos puntos y la mínima se situaría en torno a los 100. El principal condicionante de esta distribución es la morfología del terreno, que favorece la expansión lateral de las coladas allí donde no existen barreras topográficas que limiten u obliguen a la canalización del flujo.

Esta amplitud de flujo puede ser la causa por la que el modelo no ha identificado trayectorias de probabilidad alta o máxima que, en cualquier caso, se encontrarían situadas dentro de los márgenes de la principal.

En el escenario se observa también la posibilidad de que se puedan producir bifurcaciones del flujo de la colada, principalmente en su trayectoria SE. En todos los casos, pertenecen al grado de probabilidad mínimo por lo que, a priori, carecerían de relevancia.

Lo que aparece en el escenario es el sumatorio de las trayectorias obtenidas para cada uno de los centros. Al examinar cada una de ellas por separado hemos observado que son prácticamente idénticas, a pesar de las diferentes coordenadas y cotas de origen asignadas.

Del análisis de las características que adoptan los elementos bajo riesgo localizados en el área de influencia de las coladas podemos extraer varias observaciones.

Las coladas, en su progresión hacia el mar, atraviesan el territorio perteneciente a cuatro términos municipales (tabla 7.1). Los municipios en los que la probabilidad de trayectoria es mayor son los de Garachico, Santiago del Teide y El Tanque, siendo el segundo de ellos en el que se localizaría un mayor número de hectáreas afectadas en este intervalo (481), aunque Garachico es el que tendría un mayor porcentaje de su superficie comprendida en la trayectoria de las lavas.



**Tabla 7.1.** Caso I: Términos municipales potencialmente afectados por las lavas.

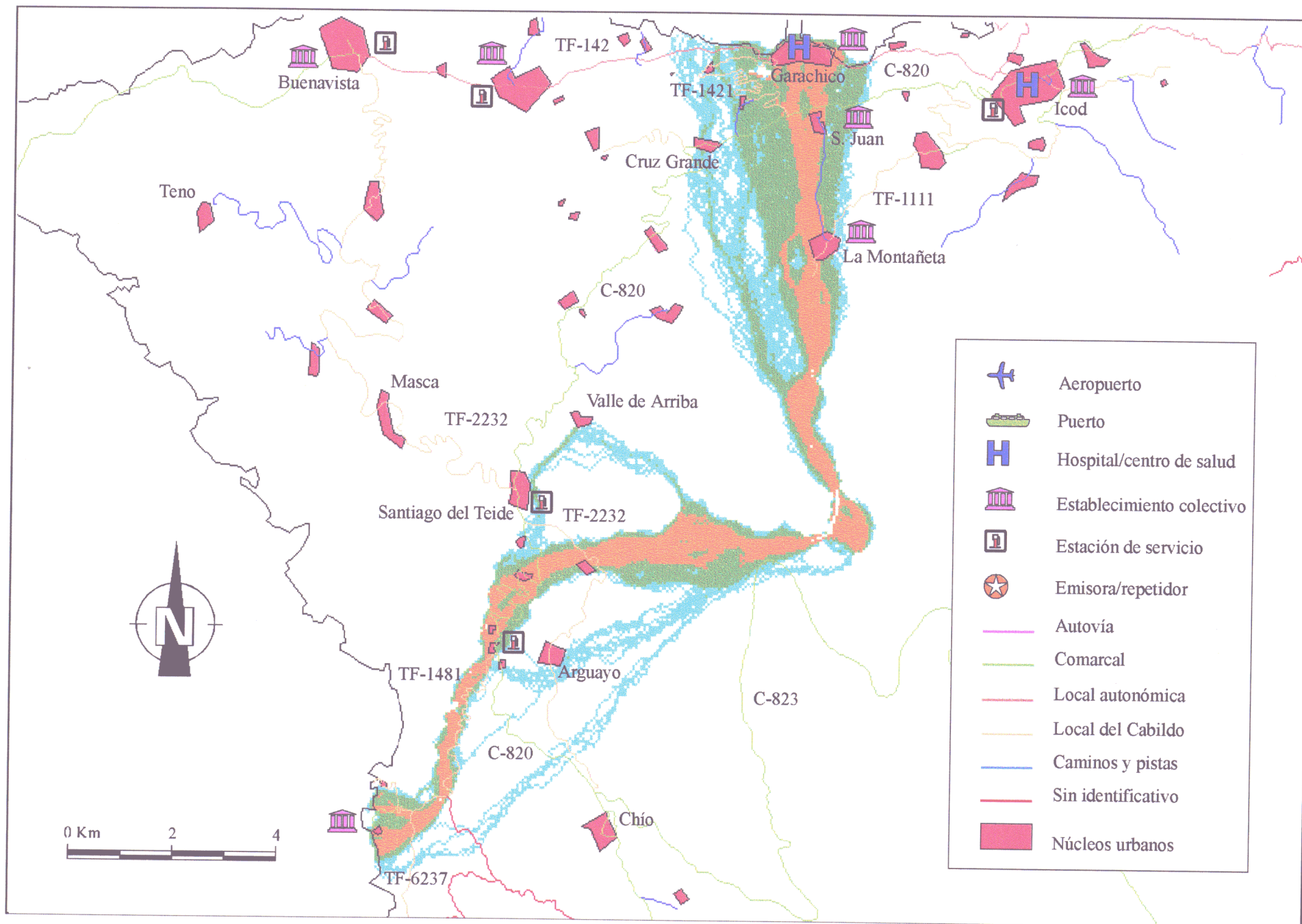
Municipio	Probabilidad	Superficie afectada (ha)	% Superficie
Garachico	mínima	263	9,02
Garachico	baja	444	15,23
<b>Garachico</b>	<b>media</b>	<b>432</b>	<b>14,82</b>
Guía de Isora	mínima	106	0,70
Santiago del Teide	mínima	494	9,50
Santiago del Teide	baja	410	7,89
<b>Santiago del Teide</b>	<b>media</b>	<b>481</b>	<b>9,26</b>
Tanque (El)	mínima	352	14,92
Tanque (El)	baja	305	12,92
<b>Tanque (El)</b>	<b>media</b>	<b>22</b>	<b>0,93</b>

El análisis detallado de cada uno de los elementos bajo riesgo de los que se dispone de información en las bases de datos ha proporcionado la base necesaria para valorar con mayor precisión la magnitud del impacto que esta erupción podría provocar.

El número de núcleos urbanos situados, en mayor o menor medida, en la trayectoria de las lavas es de catorce (figura 7.2), de los cuales ocho (es decir, el 57%) se encontrarían localizados en las áreas donde la probabilidad es mayor.

Para cada uno de los núcleos situados en la trayectoria potencial de las coladas hemos estimado el número de viviendas y la población que resultarían afectados por las mismas, clasificados en función del intervalo de probabilidad al que pertenecen las trayectorias que por ellos discurren. Para llegar a este dato, hemos calculado en primer lugar el porcentaje de superficie que en cada núcleo caería en los distintos intervalos de probabilidad.

En las bases de datos de población implementadas se dispone de información sobre el número de viviendas familiares que están censadas en cada núcleo de población afectado (excepto para El Cascajo y Malpaís, que no hay datos) y el nivel de ocupación de las mismas.



**Figura 7.2.** Representación de las vías de comunicación, núcleos urbanos y elementos estratégicos potencialmente afectados por las lavas.

Al carecer de datos más detallados hemos partido de la hipótesis de que la densidad de viviendas es uniforme en todo el casco urbano. Conocido el porcentaje de superficie que caería en cada intervalo de probabilidad y el número medio de viviendas en el mismo, hemos estimado el número de viviendas que resultarían afectadas en cada caso y, haciendo uso del ratio del número de ocupantes por vivienda, hemos calculado a continuación el número de personas que resultarían afectadas de forma directa o indirecta por las coladas (tabla 7.2).

**Tabla 7.2.** Caso I: Núcleos urbanos potencialmente afectados por las lavas.

Núcleo de población	Probabilidad	Viviendas afectadas	Población afectada	% Población
Garachico	baja	213	886	29,20
<b>Garachico</b>	<b>media</b>	<b>516</b>	<b>2146</b>	<b>70,80</b>
Manchas (Las)	baja	37	142	64,85
<b>Manchas (Las)</b>	<b>media</b>	<b>20</b>	<b>77</b>	<b>35,15</b>
Molledo (El)	mínima	17	78	65,54
Montañeta (La)	mínima	11	41	15,76
Montañeta (La)	baja	24	89	34,23
<b>Montañeta (La)</b>	<b>media</b>	<b>34</b>	<b>126</b>	<b>48,46</b>
<b>Pto. de Santiago</b>	<b>media</b>	<b>2223</b>	<b>6696</b>	<b>100,00</b>
Retamar (El)	baja	2	7	9,24
<b>Retamar (El)</b>	<b>media</b>	<b>19</b>	<b>68</b>	<b>89,47</b>
S. Juan del Reparo	baja	30	132	13,57
<b>S. Juan del Reparo</b>	<b>media</b>	<b>191</b>	<b>841</b>	<b>86,43</b>
S. Pedro de Daute	mínima	24	104	43,51
Santiago del Teide	mínima	6	20	4,49
Tamaimo	baja	189	714	36,28
<b>Tamaimo</b>	<b>media</b>	<b>332</b>	<b>1254</b>	<b>63,71</b>
Tanque (El)	mínima	583	2424	100,00
Valle de Arriba	mínima	10	43	23,75
Valle de Arriba	baja	2	9	4,97

Para hacerse idea de la magnitud relativa del impacto de las lavas, hemos introducido también en la tabla el porcentaje de población potencialmente afectada por las mismas, el cual es equivalente al porcentaje de superficie del núcleo que resultaría afectado por las coladas.

Del total de núcleos afectados de los que disponemos de datos destaca por la magnitud del impacto potencial el Puerto de Santiago, que se encontraría totalmente englobado por la trayectoria de mayor probabilidad, por lo que el porcentaje de población afectada es del 100% (6696 personas). Con niveles altos de impacto en el intervalo superior de probabilidad se encontrarían también El Retamar (89%), S. Juan del Reparo (86%) y Garachico (70%) y con niveles medios de impacto Tamaimo (63%), La Montañeta (48%) y Las Manchas (35%).

Los núcleos que, independientemente del grado de probabilidad de las trayectorias, se encontrarían situados por completo dentro de la zona potencialmente afectada por las lavas son Garachico, Las Manchas, La Montañeta, el Pto. de Santiago, El Retamar, S. Juan del Reparo, Tamaimo y El Tanque.

En cuanto a las vías de comunicación, son ocho las vías principales que resultarían potencialmente afectadas por las coladas (tabla 7.3, figura 7.2), de las cuales siete atraviesan las zonas de mayor probabilidad. De estas últimas, la C-820 sería la carretera más afectada, con un total de 6858 metros situados en el área de mayor probabilidad, los cuales se reparten principalmente en el tramo comprendido entre El Molledo y El Cascajo, situándose el resto (unos 800 m aproximadamente) en el tramo situado en el área de S. Juan del Reparo.

Del resto de las carreteras, son las locales con titularidad del Cabildo las más numerosas (TF-1111, TF-1421, TF-1481, TF-2232 y TF-6237), con un total aproximado de 6 Km afectados. La TF-142 a su paso por Garachico sería la única carretera con titularidad del Gobierno Autónomo que resultaría potencialmente afectada.

La principal consecuencia que se derivaría de los efectos que las coladas producen sobre la red de comunicaciones (destrucción por enterramiento) sería el cierre de todas las vías de comunicación hacia el extremo este de la isla. En esta zona se sitúan una veintena de pueblos y resulta además un área altamente visitada por su atractivo paisajístico (acantilados de Los Gigantes, Masca,...), lo que hace de muchas de estas carreteras vías altamente transitadas.

La distribución de las coladas dificultaría también enormemente las labores de evacuación de algunos núcleos, como por ej. el Pto. de Santiago, Tamaimo o El Retamar, los cuales son accesibles exclusivamente a través de las vías afectadas. Es en este caso en el que el factor tiempo es importante.

**Tabla 7.3.** Caso I: Vías de comunicación potencialmente afectadas por las lavas.

Carretera	Probabilidad	Nº de metros afectados
C-820	mínima	3252,2
C-820	baja	6296,3
<b>C-820</b>	<b>media</b>	<b>6857,9</b>
C-823	mínima	636,3
C-823	baja	636,3
TF-142	mínima	1414,0
TF-142	baja	2828,0
<b>TF-142</b>	<b>media</b>	<b>1838,2</b>
TF-1111	mínima	1060,5
TF-1111	baja	282,8
<b>TF-1111</b>	<b>media</b>	<b>848,4</b>
TF-1421	mínima	2828,0
TF-1421	baja	7070,0
<b>TF-1421</b>	<b>media</b>	<b>565,6</b>
TF-1481	mínima	1767,5
TF-1481	baja	3040,1
<b>TF-1481</b>	<b>media</b>	<b>3181,5</b>
TF-2232	mínima	1626,1
TF-2232	baja	636,3
<b>TF-2232</b>	<b>media</b>	<b>848,4</b>
TF-6237	mínima	353,5
TF-6237	baja	282,8
<b>TF-6237</b>	<b>media</b>	<b>636,3</b>

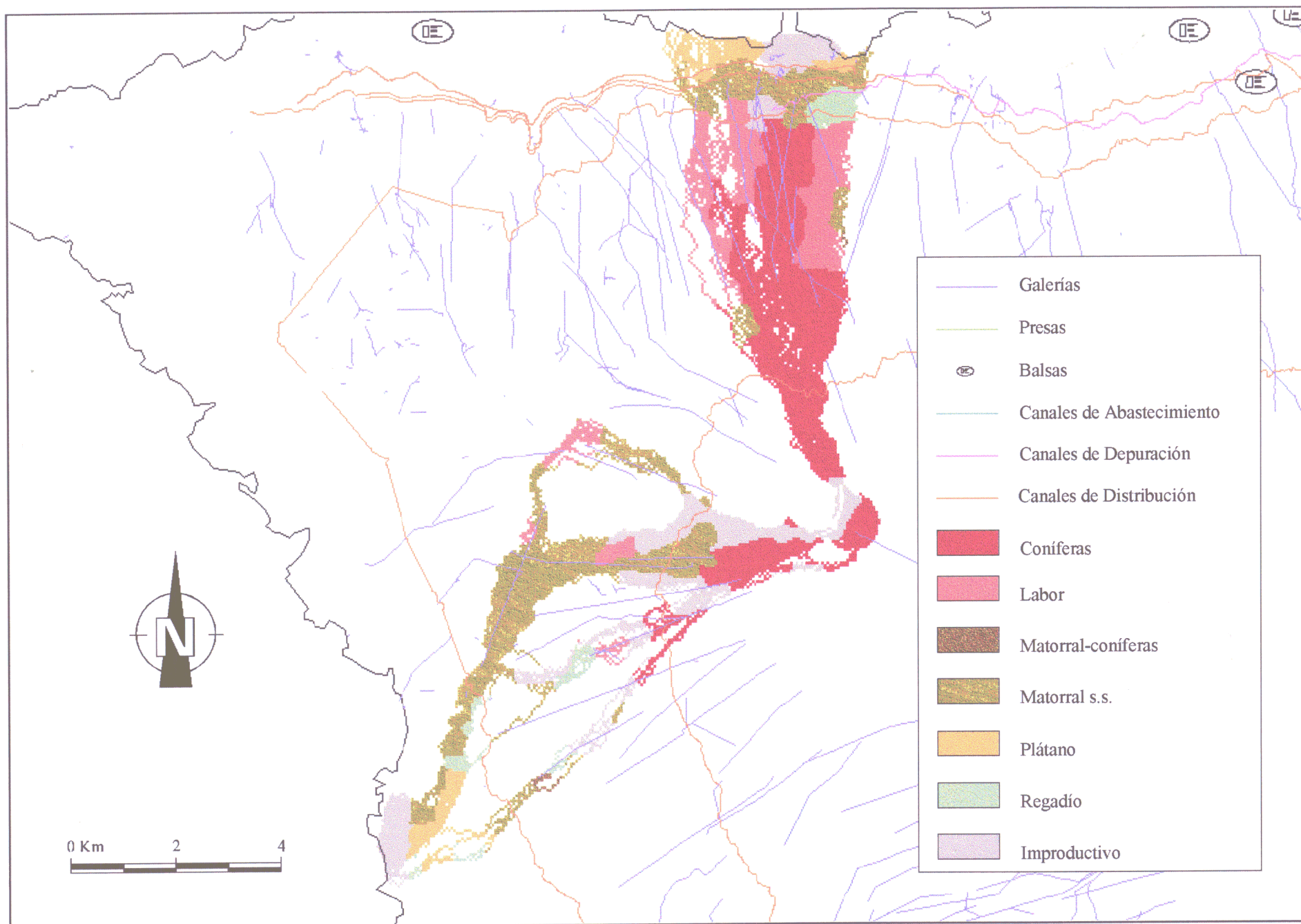


Por último, hemos evaluado los usos de suelo que se encontrarían situados en la trayectoria de las coladas (figura 7.3, tabla 7.4). Exceptuando los terrenos improductivos (no considerados en la tabla debido a que corresponden principalmente en esta zona a suelo urbano e industrial, ya considerado en el análisis de los núcleos urbanos, y al área cubierta por lavas recientes), destacaría por su magnitud la superficie afectada de coníferas (297 ha) y matorral (295 ha) en el intervalo de mayor probabilidad.

**Tabla 7.4.** Caso I: Usos del suelo potencialmente afectados por las lavas.

Uso del suelo	Probabilidad	Superficie afectada (ha)
Coníferas	mínima	332,75
Coníferas	baja	406,75
<b>Coníferas</b>	<b>media</b>	<b>297,25</b>
Labor	mínima	250,25
Labor	baja	175,75
<b>Labor</b>	<b>media</b>	<b>84,24</b>
Matorral	mínima	297,00
Matorral	baja	290,75
<b>Matorral</b>	<b>media</b>	<b>295,00</b>
Matorral-coníferas	mínima	9,74
Plátano	mínima	89,99
Plátano	baja	59,74
<b>Plátano</b>	<b>media</b>	<b>39,25</b>
Regadío	mínima	65,99
Regadío	baja	45,25
<b>Regadío</b>	<b>media</b>	<b>20,00</b>

Las zonas con población forestal que, potencialmente, son las más susceptibles frente a los incendios, se encuentran situadas preferentemente en el curso de la trayectoria norte y se extienden prácticamente hasta la costa, mientras que el matorral se encuentra asociado a la vertiente sureste.



**Figura 7.3.** Usos del suelo y canales principales de distribución de agua en las áreas pottencialmente afectadas por las lavas.

Los cultivos afectados por el curso de las lavas serían plantaciones de plátano, cultivos en regadío y tierras de labor, los dos primeros con superficies de escasa relevancia en el intervalo de mayor probabilidad. Todos ellos se encuentran situados en áreas ya próximas a la costa, excepto los terrenos de labor, que se localizan principalmente en áreas de medianías.

En cuanto a los canales principales de distribución de agua y las líneas de electricidad (figura 7.3) que en este área abastecen a toda la zona afectada por las coladas y las colindantes (principalmente el macizo de Teno), nos encontraríamos con los mismos problemas que presentan las vías de comunicación, con la pérdida total de los sistemas de distribución por enterramiento o abrasamiento de cualquier estructura que se encuentre en superficie.

El conjunto de elementos bajo riesgo analizados proporciona información sobre la magnitud que alcanza el valor expuesto. En el caso de las redes viarias, canales de distribución de agua, construcciones y usos del suelo, la vulnerabilidad frente a la acción de las lavas es del 100% lo que, como ya hemos visto, implicaría su destrucción total. Sin embargo, la vulnerabilidad de la población frente a las coladas es del 0%, por lo que no cabría esperar víctimas humanas por su efecto directo (aunque podrían producirse por causas secundarias).

Conocidos el valor expuesto y la vulnerabilidad de los elementos bajo riesgo, nos encontramos en condiciones de evaluar el riesgo potencial y expresarlo en forma de mapa. Para llegar a este punto hemos utilizado aquellos elementos bajo riesgo para los que hemos obtenido en las fases anteriores de cálculo datos de tipo cuantitativo sobre el valor expuesto (e.d. población, porcentaje de población, redes viarias y usos del suelo).

Para mantener la hipótesis de máxima magnitud adoptada para el estudio, hemos considerado que para realizar el cálculo del riesgo potencial debemos tener en cuenta todas las posibles trayectorias de las coladas independientemente del grado de probabilidad al que pertenezcan. Así pues, calculando el impacto total que cada uno de los elementos bajo riesgo sufriría si las coladas discurriesen por toda la superficie identificada como probable hemos obtenido el **riesgo máximo potencial**.

Para expresar los resultados en forma de mapa, hemos agrupado en intervalos los valores obtenidos para el impacto total (tablas 7.5 a 7.7) de acuerdo con los siguientes criterios:

- la población se ha representado en función del número total de personas que resultarían afectadas por el fenómeno y el porcentaje que ésta cantidad representa sobre el total.
- las redes viarias se han clasificado en intervalos, en función del número total de Km que resultarían afectados, a los que se les ha asignado un mismo código de color.
- los usos del suelo se han clasificado en intervalos en función del número total de hectáreas que resultarían afectadas por el fenómeno.

En el mapa resultante destacan varios elementos (figura 7.4). En primer lugar, existe un número importante de núcleos en los que el porcentaje de población afectada por las lavas alcanzaría los niveles máximos (superior al 75 %), aunque sólo el Pto. de Santiago supera los 5.000 habitantes, por lo que su posible evacuación adquiriría un carácter más complejo que la del resto de núcleos, lo que se ve apoyado por la disposición de este núcleo de población en un área de costa difícilmente accesible.

Garachico, Tamaimo y El Tanque son los núcleos que, además del Pto. de Santiago, se situarían en niveles altos de riesgo por el volumen y porcentaje de población afectada. El número de personas afectadas en los demás núcleos no superaría generalmente las 300, aunque en Las Manchas y S. Juan del Reparo éstas constituyen el total de su población. La población total potencialmente afectada en todos los núcleos sería de 15.897 personas.

En cuanto a las redes de comunicación viaria, la C-820 y la TF-1421 serían las vías afectadas en más Km. de su trazado (16,4 y 10,4 Km respectivamente), aunque el mayor número de ellas (50%) se clasifica en el intervalo comprendido entre 1 y 5 Km. Pese a ello, el nivel de pérdidas que representa incluso el menor de los intervalos sería muy elevado.

Por lo que respecta a los usos del suelo, son las áreas forestales las que estarían sometidas a un nivel superior de pérdida potencial (más de 1000 ha), que podría verse incrementada de forma importante si se dieran circunstancias favorables a la generación y propagación de incendios. El matorral y las tierras de labor son los usos que a continuación resultarían más afectados (883 y 510 ha respectivamente).

**Tabla 7.5.** Caso I: Población total potencialmente afectada por núcleo urbano en el área cubierta por las lavas.

Núcleo urbano	Población total afectada	% Población	Núcleo urbano	Población total afectada	% Población
Garachico	3032	100,00	S. Juan del Reparo	973	100,00
Manchas (Las)	219	100,00	S. Pedro de Daute	104	43,52
Molledo (El)	78	65,55	Santiago del Teide	20	4,50
Montañeta (La)	256	98,46	Tamaimo	1968	100,00
Pto, de Santiago	6696	100,00	Tanque (El)	2424	100,00
Retamar (El)	75	98,68	Valle de Arriba	52	28,73

**Tabla 7.6.** Caso I: Pérdida máxima potencial de las redes viarias situadas en el área cubierta por las lavas.

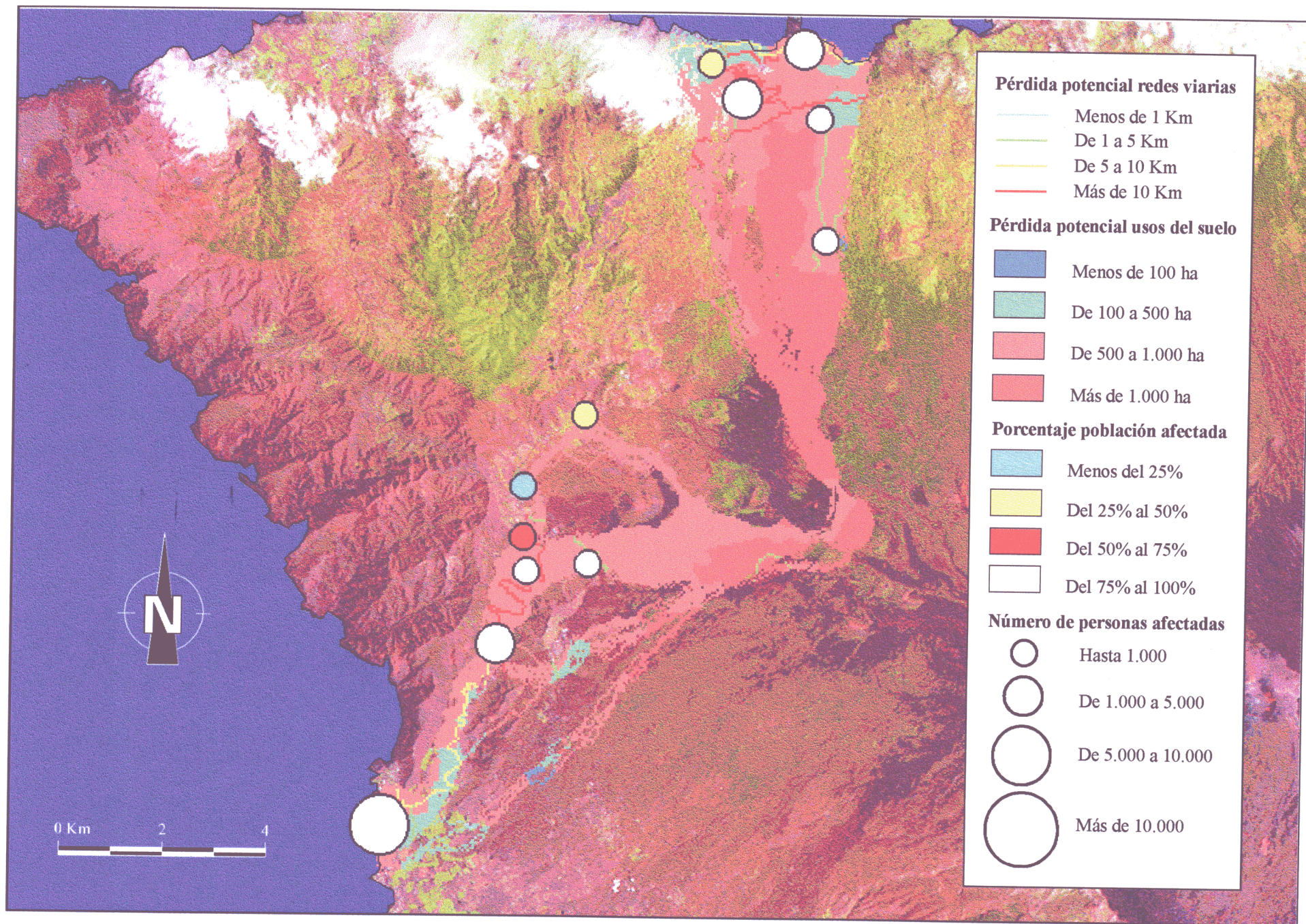
Redes viarias	Pérdidas potenciales (Km)	Redes viarias	Pérdidas potenciales (Km)
C-820	16,40	TF-1421	10,46
C-823	1,27	TF-1481	7,90
TF-142	6,08	TF-2232	3,11
TF-1111	2,19	TF-6237	1,27

**Tabla 7.7.** Caso I: Pérdida máxima potencial de los usos del suelo situados en el área cubierta por las lavas.

Usos del suelo	Pérdidas potenciales (ha)	Usos del suelo	Pérdidas potenciales (ha)
Coníferas	1026,75	Matorral-coníferas	9,75
Labor	510,25	Plátano	189,00
Matorral	882,75	Regadío	131,25

La superficie total de terreno cubierta por las lavas sería del orden de 3312 ha si se incluyen en el cálculo las 563 ha correspondientes a terrenos improductivos, lo que representa aproximadamente el 1,6 % del total de la superficie de la isla.





**Figura 7.4.** Mapa de riesgo máximo potencial para la simulación de una erupción fisural en el área de cumbres de la dorsal NW de Tenerife.



## VII.2. Caso II: Erupción en las estribaciones de la Dorsal de La Esperanza.

El segundo caso elegido para evaluar el impacto de las coladas lávicas representa una erupción a partir de un centro de emisión individual localizado en las estribaciones de la Dorsal de la Esperanza, próximo a la localidad de La Laguna. En esta zona existe una importante concentración de centros, lo que la convierte en un área de probabilidad elevada, aunque no máxima, de localización de erupciones.

Las coordenadas sobre las que hemos llevado a cabo la simulación son:

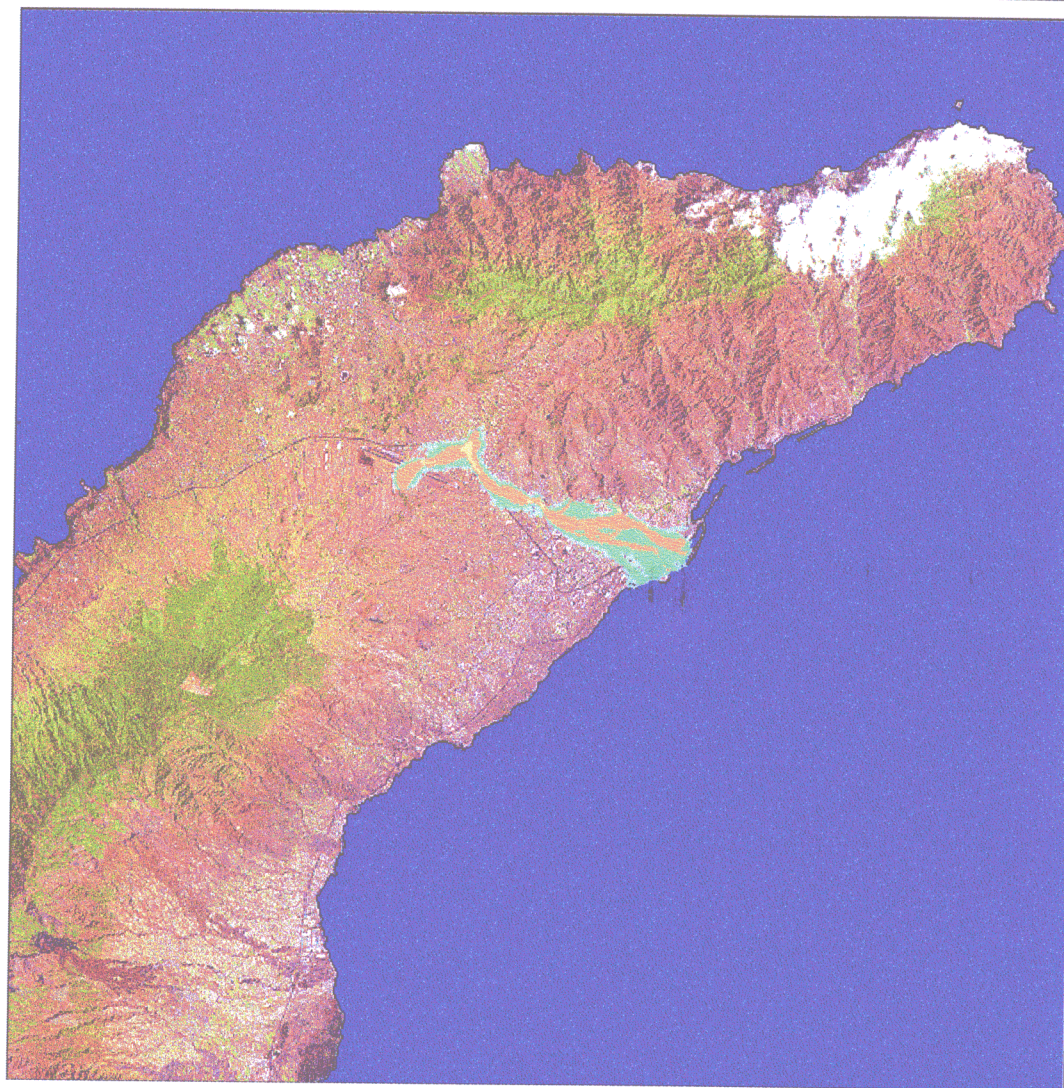
xUTM: 368.700      yUTM: 3.150.600      z: 674 m

Aunque, en contraste con el caso anterior, ésta no es una zona donde se hayan producido erupciones recientemente (el área se encuentra ocupada principalmente por depósitos de la serie III), se ha elegido debido a la proximidad de tres elementos clave en la economía de la isla: el Aeropuerto de los Rodeos y las localidades de La Laguna y Sta. Cruz de Tenerife, que son áreas de alta concentración no sólo de población, sino también de actividades de tipo industrial y, por tanto, altamente vulnerables frente a cualquier tipo de evento catastrófico.

El escenario de riesgo obtenido (figura 7.5) muestra que en este caso existiría una tendencia clara en el camino que potencialmente seguirían las coladas. La trayectoria presenta una inflexión y ensanchamiento a la altura de la localidad de La Laguna que tiene su origen probablemente en la homogeneidad del relieve en esta zona (se trata de un área topográficamente llana), con lo que las coladas tenderían a acumularse y "estancarse" en este punto. Por debajo de este área, la colada adopta la morfología típica de "abanico" en su progresión hacia el mar.

La distancia total que recorren las coladas es del orden de 10,8 Km y su anchura máxima la alcanzaría en la zona de costa donde, para el total de intervalos de probabilidad, llega a ser de 2.500 m, aunque esta cantidad se reduce hasta aproximadamente 300 m en las áreas de probabilidad media. Es en las zonas terminales donde la colada podría llegar a presentar bifurcaciones de flujo dando origen a más de un brazo que progresaría de forma independiente.

ESCENARIO DE RIESGO PARA COLADAS. CASO II: ERUPCION EN LA DORSAL NE



Probabilidad de trayectorias

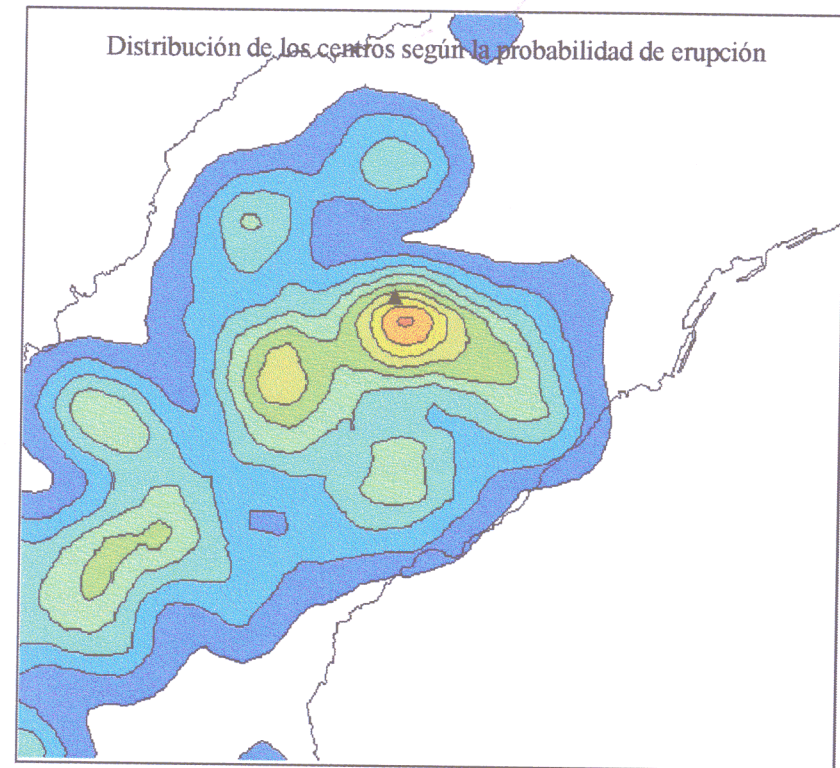
Mínima

Baja

Media

Alta

Máxima



VARIABLES DE CALCULO:

Coordenadas del centro: xUTM: 368.700 yUTM: 3.150.600

Longitud máxima: Indefinida

Altura crítica: 2 metros

Número de iteraciones: 10.000



Figura 7.5. Escenario de riesgo resultante de la aplicación del modelo para simular una erupción en las estribaciones de la dorsal de La Esperanza.



En su trayectoria, los términos municipales afectados son los de La Laguna y Sta. Cruz de Tenerife, siendo el número de hectáreas totales potencialmente afectadas por las coladas muy similar en ambos casos, aunque algo superior en el primero (tabla 7.8).

**Tabla 7.8.** Caso II: Términos municipales potencialmente afectados por las lavas.

Municipio	Probabilidad	Superficie afectada (ha)	% Superficie
Laguna (La)	mínima	118,25	1,14
Laguna (La)	baja	209,50	2,03
Laguna (La)	media	269,50	2,61
<b>Laguna (La)</b>	<b>alta</b>	<b>25,25</b>	<b>0,25</b>
Sta. Cruz de Tenerife	mínima	89,75	0,59
Sta. Cruz de Tenerife	baja	303,00	1,97
Sta. Cruz de Tenerife	media	192,75	1,25
<b>Sta. Cruz de Tenerife</b>	<b>alta</b>	<b>1,75</b>	<b>0,01</b>

Son cinco los núcleos urbanos que resultarían directamente afectados por la distribución de las coladas: Chapatal-Vista Bella, La Higuera, La Cuesta, La Laguna y Sta. Cruz (figura 7.6), aunque existe un número importante de concentraciones de tipo urbano y residencial situadas en áreas muy próximas a las de la distribución de las coladas.

De los núcleos potencialmente afectados, los tres primeros se encontrarían prácticamente englobados en la trayectoria de las lavas, aunque es La Higuera el que, por su posición, se situaría en zonas de mayor probabilidad. En las bases de datos, disponemos de estadísticas de población sólo para Sta. Cruz, La Laguna y La Cuesta, por lo que son estos núcleos sobre los que hemos centrado el análisis (tabla 7.9).

La Laguna y Sta. Cruz de Tenerife son dos de las poblaciones con mayor número de habitantes de toda la isla, por lo que las cifras obtenidas para el número de viviendas y de población afectada son muy elevadas, a pesar de que las coladas no cubrirían la totalidad de estos núcleos.

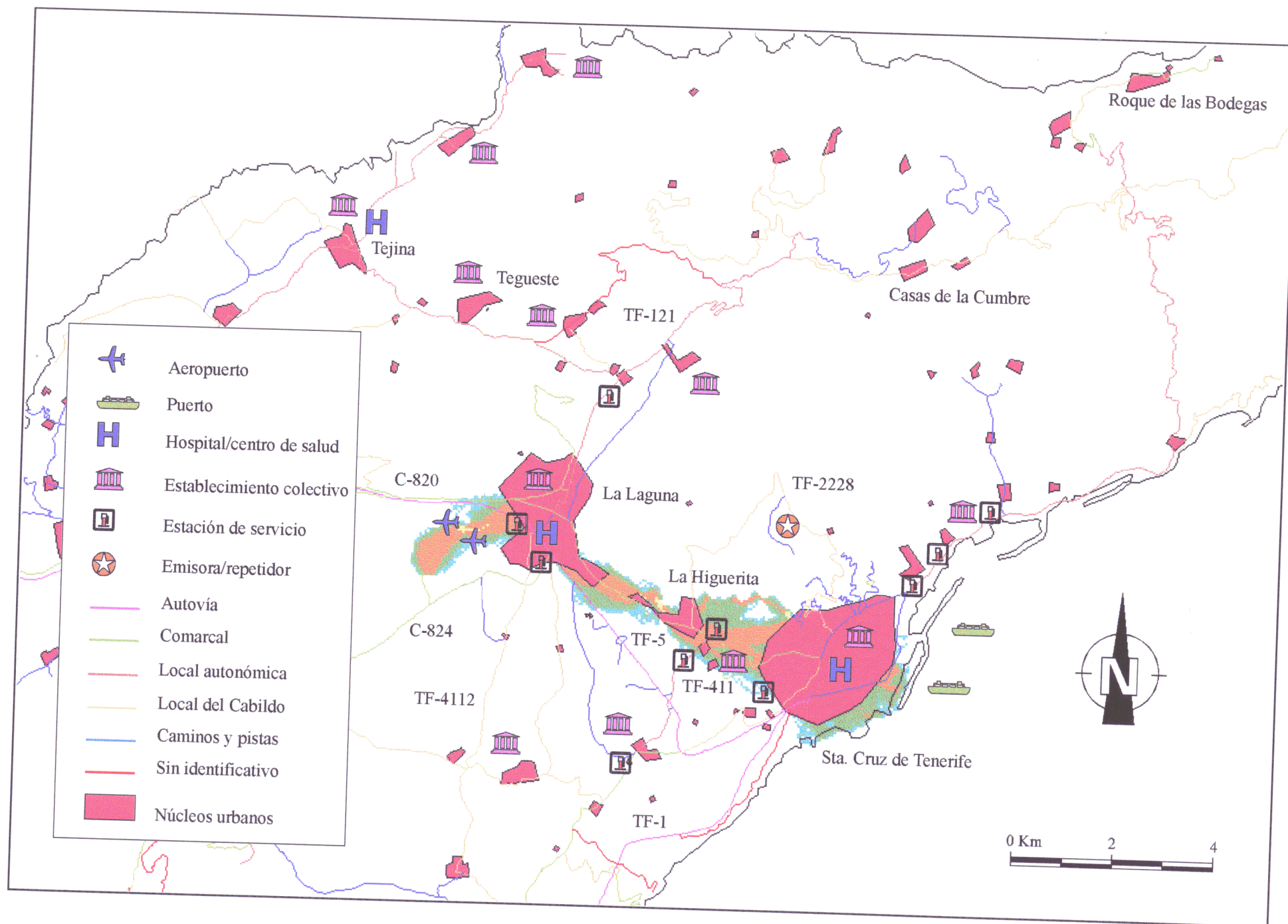
Si consideramos exclusivamente las áreas localizadas sobre trayectorias de probabilidad media y alta, se observa que son Sta. Cruz y La Cuesta, con 47.205 y 19.561 personas afectadas cada uno de ellos respectivamente, los núcleos sobre los que se centraría el impacto, aunque la localización de La Laguna en las proximidades del centro de emisión harían de su población un elemento mucho más susceptible que la de cualquiera de los otros núcleos.

**Tabla 7.9.** Caso II: Núcleos urbanos potencialmente afectados por las lavas.

Núcleo de población	Probabilidad	Viviendas afectadas	Población afectada	% Población
Cuesta (La)	baja	1680	5868	23,08
Cuesta (La)	media	5600	19561	76,92
Laguna (La)	mínima	915	3331	8,76
Laguna (La)	baja	1615	5879	15,47
Laguna (La)	media	2332	8488	22,34
<b>Laguna (La)</b>	<b>alta</b>	<b>593</b>	<b>2159</b>	<b>5,68</b>
Sta. Cruz de Tenerife	mínima	4065	14199	7,52
Sta. Cruz de Tenerife	baja	21168	73940	39,14
Sta. Cruz de Tenerife	media	13458	47009	24,88
<b>Sta. Cruz de Tenerife</b>	<b>alta</b>	<b>56</b>	<b>196</b>	<b>0,10</b>

De las redes viarias que transcurren por la zona, serían la C-820 y la TF-5 (autovía) las más seriamente afectadas por el impacto de las coladas. Estas vías constituyen la red neurálgica de comunicación de las poblaciones situadas en la vertiente norte de la isla con la capital y la zona Sur (tabla 7.10).

La primera de ellas se dispone en la trayectoria que seguirían las lavas desde el punto de inflexión de las mismas, a la altura de La Laguna, hasta Sta. Cruz, por lo que el número de Km que resultarían afectados es muy elevado (aprox. 13,5 Km). En la segunda, el impacto se localizaría a su paso por La Laguna, aunque también se vería interrumpido el tráfico en la confluencia con la TF-1 a la entrada de Sta. Cruz, justo en el límite exterior marcado por el modelo para las coladas.



**Figura 7.6.** Representación de las vías de comunicación, núcleos urbanos y elementos estratégicos potencialmente afectados por las lavas.

Esta última carretera sólo resultaría afectada en el tramo de entrada de la capital hasta el puerto de Sta. Cruz y queda comprendida en los intervalos menores de probabilidad.

**Tabla 7.10.** Caso II: Vías de comunicación potencialmente afectadas por las lavas.

Carretera	Probabilidad	Nº de metros	Carretera	Probabilidad	Nº de metros
TF-1	mínima	494,90	TF-411	baja	282,80
TF-1	baja	282,80	TF-411	media	707,00
TF-5	mínima	848,40	TF-2228	mínima	70,70
TF-5	baja	1979,60	TF-2228	baja	212,10
TF-5	media	2191,70	TF-2228	media	494,90
C-820	mínima	2262,40	TF-3115	mínima	70,70
C-820	baja	4807,60	TF-3115	baja	1201,90
C-820	media	6009,50	TF-3115	media	212,10
C-820	alta	424,20	TF-4112	mínima	70,70
C-824	baja	424,20	TF-4112	baja	70,70
TF-121	mínima	212,10	TF-4113	mínima	141,40
TF-121	baja	494,90	TF-4113	baja	141,40
TF-121	media	212,10			

Aunque hay un número importante de carreteras que potencialmente estarían afectadas por el fenómeno en mayor o menor grado (10 en total) se observa que el impacto más severo se encontraría bien localizado. La densidad de la red viaria y su disposición frente a la de las coladas permitiría además la evacuación de las áreas urbanas utilizando trazados alternativos, ya que no se llegaría a producir la incomunicación total de ninguno de los núcleos urbanos adyacentes.

Un impacto significativo que se derivaría del desarrollo de las coladas en este caso es la destrucción parcial del aeropuerto de Los Rodeos, situado en plena trayectoria de las mismas, muy próximo al centro emisor seleccionado. Las lavas cruzarían sobre las pistas del aeropuerto, las cuales quedarían cubiertas en una franja de aproximadamente 450 metros situada justo en su parte central, lo que las inutilizaría por completo.

El puerto de Sta. Cruz también podría verse seriamente afectado por las coladas, que podrían llegar a obstruirlo a pesar de que se encuentra situado en un área de baja probabilidad. Las instalaciones de la refinería que se encuentran localizadas a la entrada de la ciudad en la zona de confluencia entre la TF-5 y la TF-1 se podrían convertir en un área de alto riesgo (incendios, explosiones, vertidos, etc.) si las coladas llegasen a alcanzarlas.

En Sta. Cruz y La Laguna se localizan además un número importante del total de plazas hospitalarias de la isla, por lo que los servicios de salud y asistencia médica podrían verse seriamente interrumpidos.

En cuanto a los usos del suelo presentes en el área, debido a la elevada concentración de actividades del sector terciario (industria y comercio) en la zona, es el improductivo sobre el que se centraría el mayor impacto de las lavas (tabla 7.11).

**Tabla 7.11.** Caso II: Usos de suelo potencialmente afectados por las lavas.

Uso del suelo	Probabilidad	Superficie afectada (ha)
Improductivo	mínima	165,50
Improductivo	baja	438,50
Improductivo	media	385,25
<b>Improductivo</b>	<b>alta</b>	<b>23,50</b>
Labor	mínima	39,25
Labor	baja	42,00
Labor	media	68,75
<b>Labor</b>	<b>alta</b>	<b>3,50</b>
Matorral	mínima	7,25
Matorral	baja	37,25
Matorral	media	8,75
Pastizal	mínima	7,50
Pastizal	baja	4,00
Pastizal	media	0,25

En el área afectada, son poco significativas las superficies dedicadas a explotaciones agrícolas y la vegetación natural predominante es el matorral, también escasamente representado. Por este motivo, no hemos representado gráficamente la información correspondiente a los usos del suelo.

En lo que respecta a las redes de distribución de agua y electricidad, las líneas principales de abastecimiento y depuración de aguas así como las líneas eléctricas apenas resultarían afectadas en esta zona y el área tampoco se encuentra perforada por un número significativo de galerías.

Los datos obtenidos, caracterizan en conjunto el tipo y magnitud de los impactos que podrían derivarse como consecuencia de la simulación realizada. En el mapa de riesgo máximo potencial obtenido a partir de ellos (figura 7.7) destacan tres elementos:

- la población total afectada en los tres núcleos de los que se dispone de información sería en todos los casos muy elevada, superando en Sta. Cruz las 100.000 personas, aunque La Cuesta sería el único núcleo afectado en su totalidad (100%). La población total afectada en estos tres núcleos sería de 178.690 personas.
- la C-820 sería la única vía de comunicación afectada en más de 5 Km de su recorrido, presentando también la TF-5 y TF-3115 pérdidas importantes clasificadas en el intervalo entre 1 y 5 Km, situándose el resto por debajo de esta cifra.
- los usos de suelo afectados corresponderían principalmente a áreas de actividades de tipo urbano e industrial, con cifras próximas a las 1.000 ha.

La superficie de terreno potencial cubierto por las lavas sería del orden de 1.220 ha, lo que representa en términos absolutos aproximadamente el 0,6% de la superficie de la isla.

Las cifras totales correspondientes a cada uno de estos elementos se encuentran representadas en las tablas 7.12 a 7.14.

**Tabla 7.12.** Caso II: Población total potencialmente afectada por núcleo urbano en el área cubierta por las lavas.

<b>Núcleo Urbano</b>	<b>Población total afectada</b>	<b>% Población</b>
Cuesta (La)	25429	100,00
Laguna (La)	19857	52,26
Sta. Cruz de Tenerife	135344	71,64

**Tabla 7.13.** Caso II: Pérdida máxima potencial de las redes viarias situadas en el área cubierta por las lavas.

<b>Redes Viarias</b>	<b>Pérdida potencial (Km)</b>
TF-1	0,78
TF-5	5,02
C-820	13,50
C-824	0,42
TF-121	0,92
TF-411	0,99
TF-2228	0,78
TF-3115	1,48
TF-4112	0,14
TF-4113	0,28

**Tabla 7.14.** Caso II: Pérdida máxima potencial de los usos del suelo situados en el área cubierta por las lavas.

<b>Usos del suelo</b>	<b>Pérdida potencial (ha)</b>
Improductivo	1003,75
Labor	153,50
Matorral	53,25
Pastizal	11,75



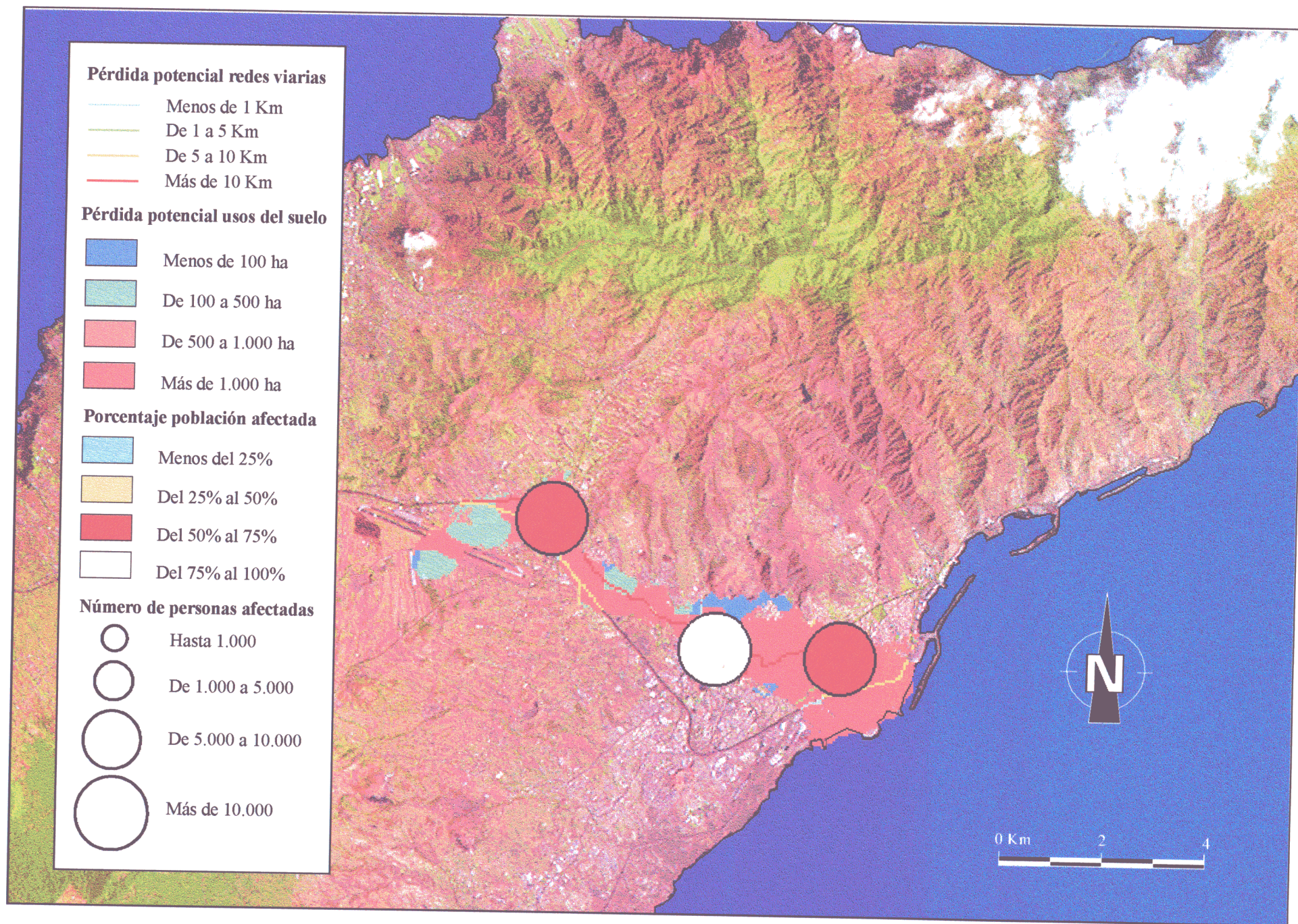


Figura 7.7. Mapa de riesgo máximo potencial para la simulación de una erupción en las estribaciones de la dorsal de La Esperanza.



### VII.3. Caso III: Erupción en las laderas Sur de la isla.

El último caso sobre el que hemos realizado la evaluación del riesgo se ha basado en la hipótesis de que se produzca una erupción puntual localizada en las laderas Sur de la isla. Las coordenadas seleccionadas para el centro de emisión teórico han sido:

$$x_{UTM}: 336.200 \quad y_{UTM}: 3.113.200 \quad z: 1193 \text{ m}$$

En el área seleccionada, al igual que en el caso anterior, no existen centros de emisión recientes (pertenecen a la serie III), aunque sí los hay pertenecientes a la serie IV en zonas cercanas a ésta, situados en la proximidad de la costa.

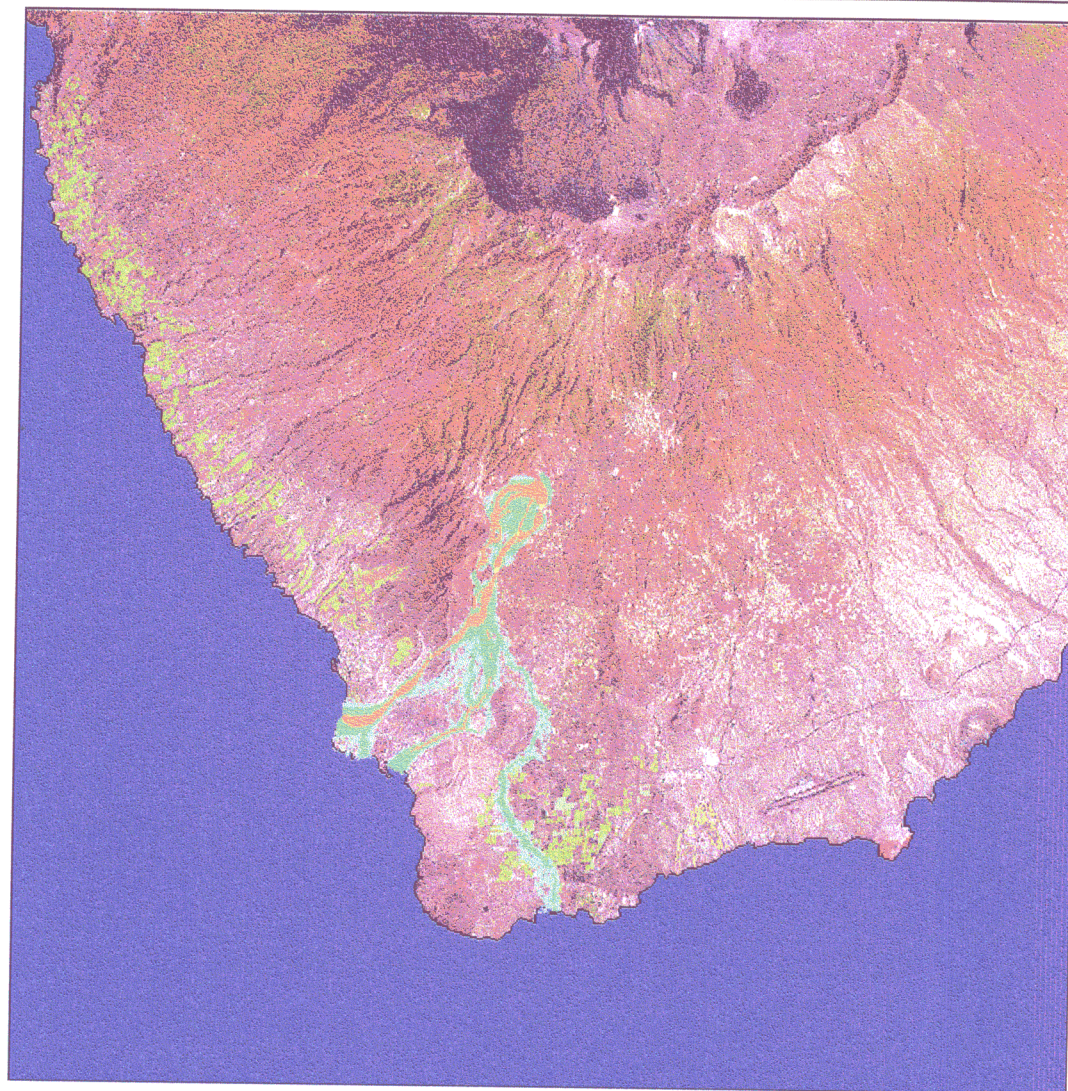
De hecho, el centro de emisión seleccionado se encuentra situado en la vertiente Sur de un máximo topográfico local originado a partir de una emisión anterior que generó un cono de escorias de grandes dimensiones que marca la divisoria por la margen derecha del barranco del Funes y en el que tienen su origen los barrancos de Las Casas y del Ancón (figura 7.8).

Esta localización topográfica favorable es el motivo por el que, en su área origen, las lavas tenderían a discurrir a favor de dos trayectorias independientes aprovechando las dos vertientes con máxima pendiente a partir del punto de emisión.

La existencia, en zonas topográficamente más bajas, de las estribaciones del macizo del Roque del Conde hacia el Este y la misma canalización que sufren las coladas al aprovechar en su curso los valles ya excavados por los barrancos dan lugar a que, algo más adelante, los cursos seguidos por ambas trayectorias vuelvan a unificarse para que, una vez superado este obstáculo a la altura aproximada de Arona, las lavas se encuentren un relieve mucho más suave que presenta pocas barreras a su expansión lateral.

A partir de ese punto, son tres las trayectorias principales que podrían seguir las coladas, aunque sólo en dos de ellas la probabilidad corresponde a niveles medios. En todas ellas, son numerosas las bifurcaciones de flujo que ha identificado el modelo y en la trayectoria de mayor magnitud (la occidental) las lavas adoptan, al igual que en el caso anterior, la típica morfología en abanico en la zona costera, la cual no es tan clara en las otras dos trayectorias.

ESCENARIO DE RIESGO PARA COLADAS. CASO III: ERUPCION EN LAS LADERAS S



Probabilidad de trayectorias

Mínima

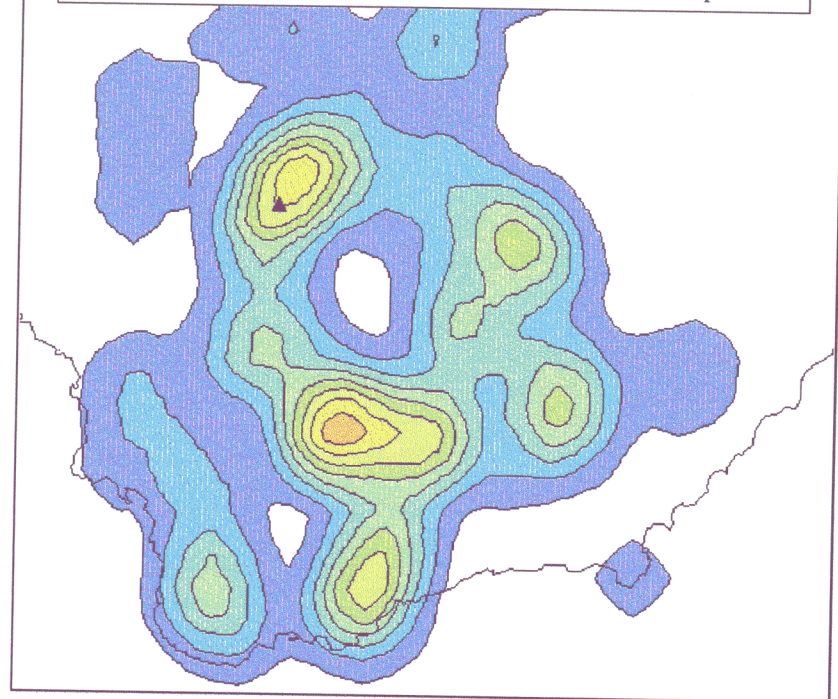
Baja

Media

Alta

Máxima

Distribución de los centros según la probabilidad de erupción



VARIABLES DE CALCULO:

Coordenadas del centro: xUTM: 336.200 yUTM: 3.113.200

Longitud máxima: Indefinida

Altura crítica: 2 metros

Número de iteraciones: 10.000

0 Km 5 10

Figura7.8. Escenario de riesgo resultante de la aplicación del modelo para simular una erupción en las laderas Sur de la isla.



La distancia máxima que recorren las coladas es de aproximadamente 16 Km en su tramo oriental, mientras que las trayectorias occidental y central alcanzan distancias del orden de los 11 Km en el primer caso y algo más en el segundo.

El área de mayor expansión lateral de las coladas se sitúa justo a la salida del área en la que se produce la canalización de las mismas y aparecen las tres trayectorias principales, donde las coladas llegan a expandirse aproximadamente 2.500 m. Sin embargo, cada uno de los brazos individuales no supera en muchas zonas los 200 m de amplitud excepto en sus áreas más "distales".

En su trayectoria, las lavas atravesarían el territorio de tres términos municipales: Adeje, Arona y Vilaflor. De éstos, es Arona el que tendría una mayor superficie afectada, casi cinco veces superior a la de Vilaflor y muy por encima de la de Adeje, en el que las lavas sólo afectarían un total de 37,5 ha, por lo que el impacto que podría producir la erupción es, a primera vista, de escasa magnitud (tabla 7.15).

**Tabla 7.15.** Caso III: Términos municipales afectados por la simulación.

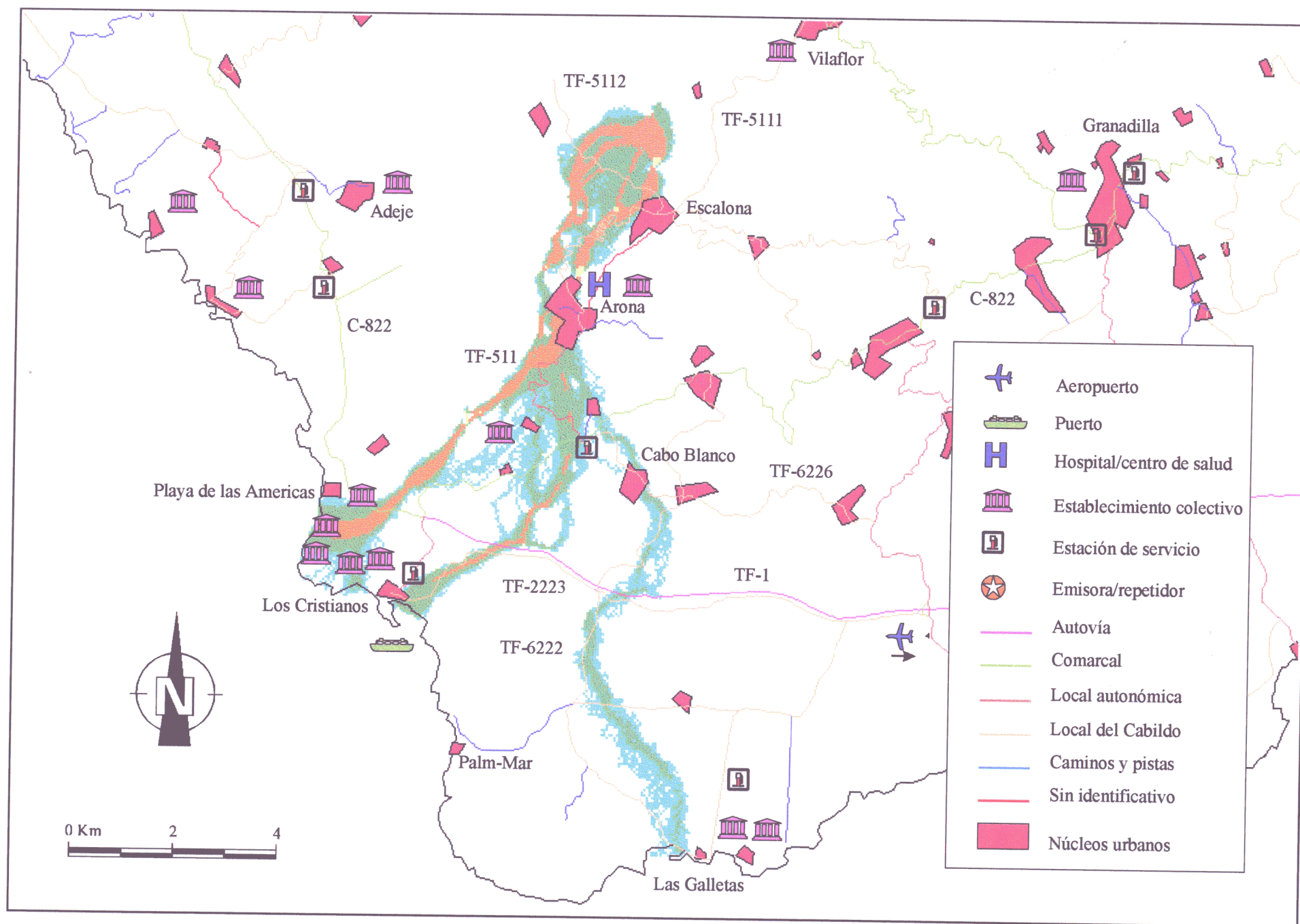
Municipio	Probabilidad	Superficie afectada (ha)	% Superficie
Adeje	mínima	20,75	0,20
Adeje	baja	12,50	0,12
Adeje	media	4,00	0,04
<b>Adeje</b>	<b>alta</b>	<b>0,25</b>	<b>0,00</b>
Arona	mínima	680,50	8,38
Arona	baja	618,50	7,61
Arona	media	227,75	2,80
<b>Arona</b>	<b>alta</b>	<b>4,00</b>	<b>0,05</b>
Vilaflor	mínima	44,25	0,78
Vilaflor	baja	183,75	3,26
Vilaflor	media	140,75	2,50
<b>Vilaflor</b>	<b>alta</b>	<b>3,25</b>	<b>0,06</b>

El número total de núcleos urbanos situados en cualquiera de las trayectorias de las lavas es de ocho, aunque no disponemos de estadísticas de población para uno de ellos (La Sabinita). Ninguno de los núcleos se encuentra localizado en el área de probabilidad alta de trayectorias y, de los que se sitúan sobre zonas de probabilidad intermedia, sólo Arona presentaría un número significativo de personas afectadas (figura 7.9, tabla 7.16).

Un dato interesante de las estadísticas se obtiene al observar la importante cantidad de personas que se asocia con los intervalos inferiores de probabilidad, principalmente en Los Cristianos y la Playa de las Américas, ambos situados en la línea de costa. En éstas áreas existe una elevada cantidad de viviendas concentradas en una superficie muy pequeña y, aunque el nivel de ocupantes por vivienda no es muy elevado (aprox. 2,8), esta importante densidad de urbanización eleva considerablemente la cantidad de personas afectadas a pesar de que la superficie total no superaría el 50% en ninguno de los dos casos.

**Tabla 7.16.** Caso III: Núcleos urbanos potencialmente afectados por las lavas.

Núcleo de Población	Probabilidad	Viviendas afectadas	Población afectada	% Población
Arona	mínima	52	198	9,66
Arona	baja	198	756	36,90
Arona	media	158	603	29,43
Cabo Blanco	mínima	381	1570	45,28
Cabo Blanco	baja	156	643	18,55
Camella (La)	mínima	307	1169	72,44
Camella (La)	baja	77	293	18,23
Chayofa	mínima	61	157	20,03
Cristianos (Los)	mínima	1064	3245	12,72
Cristianos (Los)	baja	1216	3709	14,54
Escalona	mínima	14	46	5,45
Escalona	baja	6	20	2,37
Escalona	media	3	10	1,18
Playa de las Américas	mínima	1580	4541	41,18



**Figura 7.9.** Representación de las vías de comunicación, núcleos urbanos y elementos estratégicos potencialmente afectados por las lavas.

En el otro extremo se encuentran La Camella y Cabo Blanco, en los que las cifras elevadas proceden del hecho de que un porcentaje importante de su superficie se encuentra localizado sobre las trayectorias, unido a la elevada densidad de ocupantes por vivienda que, en el segundo núcleo, se eleva hasta más de 4.

Las únicas localidades situadas por completo en la trayectoria de las lavas serían Chayofa y La Sabinita, presentando el resto entre el 8 (Escalona) y el 74% (Arona) de su superficie afectada.

Aunque no aparecen físicamente como núcleos de población, todo el área costera situada entre la Playa de las Américas y Los Cristianos está densamente ocupada por instalaciones y complejos de tipo turístico repartidos justo en el área en la que se distribuiría el "abanico" identificado en la trayectoria oriental.

Esta característica haría necesario identificar con precisión las áreas en las que se sitúan los complejos e incluir información sobre el tipo de urbanización existente en la zona para obtener una valoración de las pérdidas potenciales.

Para las vías de comunicación nos encontramos con una situación similar a la que presentan los núcleos de población (tabla 7.17). No hay ninguna carretera que cruce un área de probabilidad alta de trayectoria y, para las que se sitúan sobre zonas de probabilidad media, sólo sería significativo el impacto sobre la TF-5112 y TF-5113, las cuales confluyen en Escalona, donde termina la primera y continúa la segunda hasta Arona, siendo éste el tramo en el que resultaría afectada.

La TF-511, que continúa a su vez a la anterior, sería la siguiente carretera afectada en orden de magnitud, tanto para el intervalo de mayor probabilidad como globalmente y es la única carretera del Gobierno Autónomo que resultaría afectada.

En cuanto a las autovías, la TF-1 resultaría afectada en dos de las tres trayectorias por las que discurrirían las coladas. En la actualidad, aunque no figure así en las bases de datos, la autovía se está prolongando para que llegue hasta Adeje, por lo que el número de Km afectados sería superior al que consta en las tablas.

**Tabla 7.17.** Caso III: Vías de comunicación potencialmente afectadas por las lavas.

Carretera	Probabilidad	Nº de metros afectados	Carretera	Probabilidad	Nº de metros afectados
TF-1	mínima	1201,90	TF-5112	mínima	1696,80
TF-1	baja	494,90	TF-5112	baja	2121,00
TF-1	media	282,80	TF-5112	media	3181,50
C-822	mínima	2898,70	TF-5113	mínima	212,10
C-822	baja	1484,70	TF-5113	baja	1696,80
C-822	media	424,20	TF-5113	media	1060,50
TF-511	mínima	1272,60	TF-6222	mínima	3322,90
TF-511	baja	4100,60	TF-6222	baja	2262,40
TF-511	media	777,70	TF-6225	mínima	636,30
TF-2223	mínima	1201,90	TF-6225	baja	353,50
TF-2223	baja	2262,40	TF-6226	mínima	1767,50
TF-2223	media	494,90	TF-6226	baja	494,90

El efecto más inmediato de las trayectorias que se han obtenido sería el corte de todas las vías de comunicación que se dirijen hacia las zonas de Las Américas, Los Cristianos y Las Galletas, en las que se concentran el mayor número de alojamientos turísticos, con lo que la economía de la isla se podría ver seriamente afectada.

Además, la densidad de urbanización y el alto nivel de ocupación turística en estas zonas a lo largo de todo el año hace que la población flotante alcance cifras muy elevadas, lo que podría dificultar el tránsito de forma significativa en caso de evacuación.

La distribución de las coladas no impediría en principio las comunicaciones entre los núcleos situados en la parte oriental y occidental de la isla, pero podría llegar a dificultarlas seriamente al ser el único camino libre de paso que queda en toda la zona el que, utilizando la C-822, llega hasta el área de Las Cañadas desde Vilaflor. Desde este punto, es posible tomar la carretera que conduce a Chío en la parte oriental de la isla.

Esta disposición también afectaría al tráfico de viajeros a y desde el aeropuerto Sur de Tenerife (Aeropuerto Reina Sofía) y podría ser el origen de la colmatación o destrucción de los puertos deportivos de Las Américas, Los Cristianos y Las Galletas, localizados justo en la trayectoria de las lavas hacia la costa. El pto. de Los Cristianos es también el punto del que parten las líneas marítimas que comunican Tenerife con las islas de Gomera y Hierro.

El uso del suelo dominante en todo el área afectada es el matorral, seguido por el improductivo (que en este caso representa a las zonas de complejos turísticos) y superficies de escasa importancia de frutales en regadío, plátano, pastizal, regadío y viña (tabla 7.18).

Las coladas interrumpirían además de forma importante dos de los canales de abastecimiento de agua y la línea principal de abastecimiento eléctrico.

**Tabla 7.18.** Caso III: Usos del suelo potencialmente afectados por las lavas.

Uso del Suelo	Probabilidad	Superficie afectada (ha)	Uso del suelo	Probabilidad	Superficie afectada (ha)
Frutales regadío	mínima	10,75	Pastizal	mínima	79,50
Frutales regadío	baja	9,50	Pastizal	baja	53,75
Frutales regadío	media	2,75	Plátano	mínima	47,75
Improductivo	mínima	93,00	Plátano	baja	9,25
Improductivo	baja	119,25	Regadío	mínima	3,50
Improductivo	media	23,50	Regadío	baja	22,50
Matorral	mínima	514,75	Regadío	media	19,75
Matorral	baja	590,00	Viña	mínima	3,00
Matorral	media	319,50	Viña	baja	5,50
Matorral	alta	7,50	Viña	media	2,00

Todos estos datos se han visto reflejados en el mapa de riesgo máximo potencial obtenido a partir de los mismos (figura 7.10, tablas 7.19 a 7.21).



**Tabla 7.19.** Caso III: Población potencialmente afectada por núcleo urbano en el área cubierta por las lavas.

Núcleo urbano	Población total afectada	% Población
Arona	1557	75,99
Cabo Blanco	2213	63,83
Camella (La)	1462	90,98
Chayofa	157	20,03
Cristianos (Los)	6954	27,27
Escalona	76	9,00
Playa de las Américas	4541	41,19

**Tabla 7.20.** Caso III: Pérdida máxima potencial de las redes viarias situadas en el área cubierta por las lavas.

Redes viarias	Pérdida potencial (Km)	Redes viarias	Pérdida potencial (Km)
TF-1	1,98	TF-5113	2,97
C-822	4,80	TF-6222	5,58
TF-511	6,15	TF-6225	0,99
TF-2223	3,96	TF-6226	2,26
TF-5112	7,00		

**Tabla 7.21.** Caso III: Pérdida máxima potencial de los usos del suelo situados en el área cubierta por las lavas.

Uso del suelo	Pérdida potencial (ha)	Uso del suelo	Pérdida potencial (ha)
Frutales regadío	23,00	Plátano	57,00
Improductivo	235,75	Regadío	45,75
Matorral	1431,75	Viña	10,50
Pastizal	133,25		

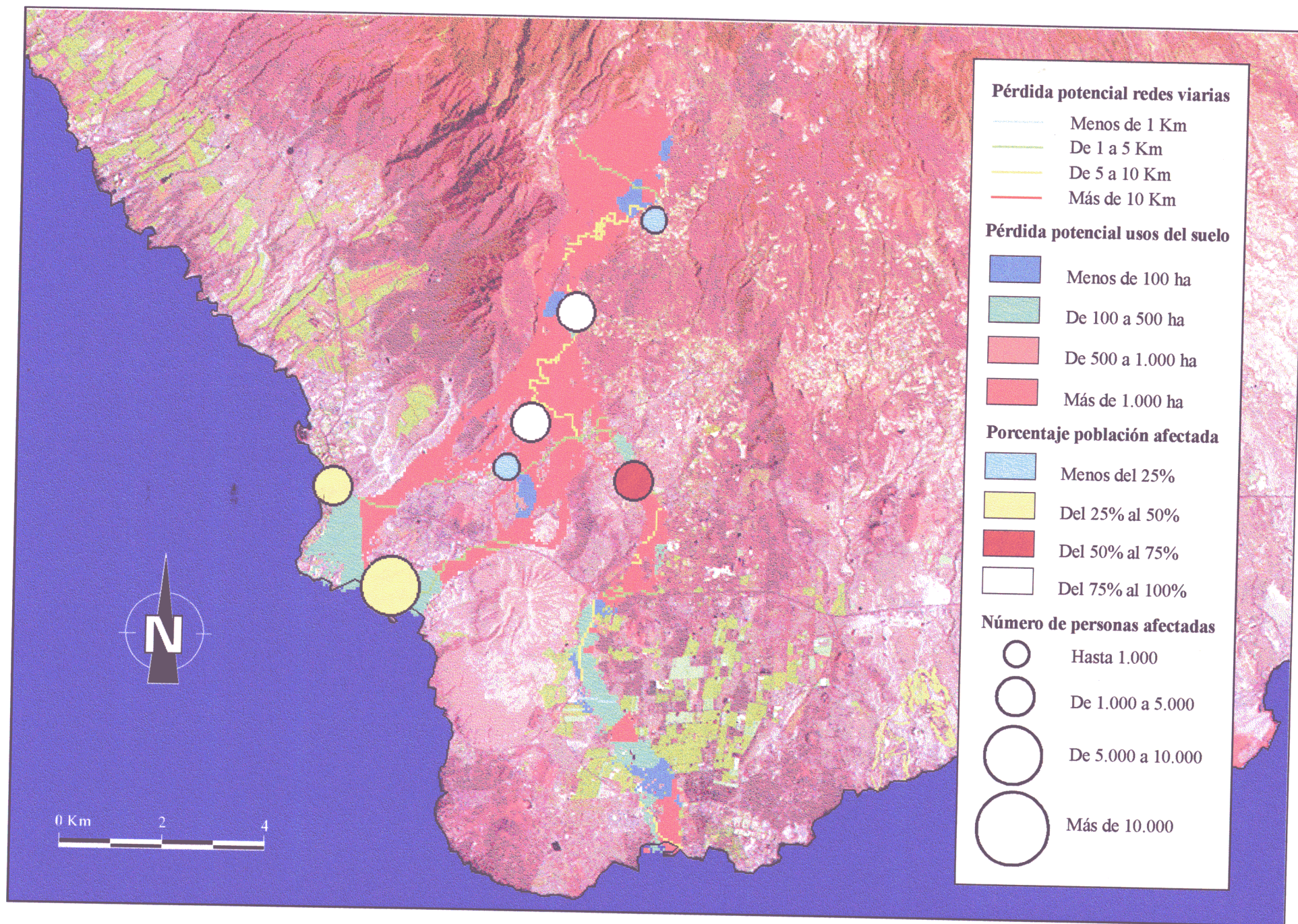
En este último caso la población total afectada se situaría en torno a las 16.960 personas, a las que habría que añadir por su magnitud la población flotante de tipo turístico que se localiza principalmente en el área de Los Cristianos y Las Américas y que habría que evacuar. Es de destacar que un porcentaje muy elevado de esta última corresponde a turistas extranjeros, preferentemente de nacionalidad inglesa y alemana, lo que dificultaría este tipo de labores.

Las vías de comunicación afectadas en mayor grado serían carreteras de tipo secundario, aunque los daños potenciales a las vías principales (la autovía TF-1 y la comarcal C-820) serían también de consideración si bien, como ya hemos indicado, la situación no impediría en principio el desalojo de los núcleos urbanos afectados, principalmente debido a que las vías rápidas se encuentran a mayor distancia del centro de emisión con lo que el tiempo de que se dispondría sería probablemente suficiente para que pudiesen tener lugar ordenadamente.

En cuanto a los usos del suelo afectados, la mayor parte de las hectáreas corresponderían a matorral y los cultivos agrícolas de la zona resultarían poco afectados. Es significativa la pérdida potencial de los usos improductivos que, aunque no son elevados en magnitud, pueden inducir importantes pérdidas económicas ya que corresponden en un elevado porcentaje al área de complejos turísticos situada en torno a los núcleos de Los Cristianos, Playa de las Américas y en las proximidades de Las Galletas.

La superficie total potencialmente afectada por las lavas se situaría en torno a las 1937 ha, lo que representa aproximadamente el 0,9 de la superficie de la isla.





**Figura 7.10.** Mapa de riesgo máximo potencial para la simulación de una erupción en las laderas Sur de Tenerife.



#### VII.4. Análisis comparativo del riesgo potencial.

Como hemos señalado previamente, el objeto principal de los ensayos que hemos realizado es el de establecer una base sobre la cual comparar y analizar la forma en la que podría afectar a los elementos bajo riesgo un mismo fenómeno, en función de la zona de la isla en la que tuviese lugar su origen.

Para que esta comparación fuera posible, hemos partido de la hipótesis de máximo riesgo, permitiendo que las coladas alcanzasen la mayor extensión que les fuera posible, y hemos aplicado las mismas condiciones de partida (altura crítica y número de iteraciones) en las tres simulaciones realizadas.

En cada uno de los casos considerados, el proceso de evaluación del riesgo ha puesto de manifiesto la localización y características de aquellos elementos sobre los que los efectos de la erupción representada serían potencialmente más perjudiciales (figuras 7.4, 7.7 y 7.10).

A primera vista, parecería posible extraer algunas conclusiones inmediatas relacionadas con la forma en la que el mismo fenómeno se comporta en función de que se desarrolle en distintos puntos de la isla, utilizando como fuente de información los datos producidos en los apartados precedentes.

Sin embargo, antes de comparar los efectos potenciales que se derivan en cada caso es conveniente abordar dos cuestiones: (1) la probabilidad que tendría de producirse en el futuro cada uno de los casos y (2) el grado de verosimilitud del escenario que ha proporcionado el modelo al hacer la simulación. Este análisis resulta fundamental para interpretar y ajustar los datos obtenidos al evaluar el riesgo potencial.

Por lo que respecta a la probabilidad espacial, el caso I (situado en la dorsal NE) es en el que, comparativamente, los centros de emisión seleccionados se encuentran localizados en un área con mayor probabilidad de ocurrencia de erupciones (véase figuras 7.1, 7.5 y 7.8), si bien ésta no se corresponde con el grado máximo identificado para la isla. Esta situación es similar para el caso II (dorsal de la Esperanza) y sólo en el caso III (laderas S de la isla) el centro de emisión se encuentra localizado en una zona donde la probabilidad es media-baja.

El análisis de la probabilidad de ocurrencia de la erupción se puede completar con el análisis de la edad de los productos presentes en la zona donde se ha iniciado la simulación para obtener una estimación de la probabilidad temporal de ocurrencia de las mismas.

Para este caso, la situación más favorable recae de nuevo sobre el primer ensayo realizado (caso I). Los centros seleccionados como punto de origen de la simulación se encuentran localizados en una de las áreas donde se ha concentrado la actividad eruptiva de la isla en sus últimas fases y en la que se disponen algunas de las erupciones históricas (figura 7.1), incluida la más reciente de todas ellas (Chinyero, 1909).

Los dos casos restantes tienen su origen en áreas donde la actividad predominante corresponde a episodios pertenecientes a la serie III, por lo que la probabilidad temporal de ocurrencia de erupciones en el futuro es aparentemente menor.

En cuanto a la distribución que hemos obtenido para los productos que se generarían en las erupciones simuladas (escenarios de riesgo), en los tres casos seleccionados se observa una o dos trayectorias bien definidas aunque, excepto para aquellas áreas donde el flujo quedaría canalizado por la presencia de barreras topográficas, éstas han quedado clasificadas por el modelo dentro de un nivel intermedio de probabilidad (figuras 7.2, 7.6 y 7.9).

Salvo para el caso II, en el que las coladas se distribuyen siguiendo un patrón bastante uniforme, el modelo ha identificado también varias trayectorias secundarias que podrían dar origen a bifurcaciones de flujo aunque, en casi todas las ocasiones, la probabilidad de que éstas se desarrollen sería bastante reducida.

A pesar de que al aplicar el modelo se ha asumido la hipótesis de que las coladas podrían llegar a alcanzar la línea de costa (dejando el parámetro  $I_{\max}$  indefinido), es importante, a la hora de interpretar los resultados, analizar el grado de verosimilitud que supone aceptar esta condición en cada uno de los casos.

Así, para la erupción con origen en la dorsal NE (caso I) parece factible que, con una aportación suficiente de lava, las coladas puedan llegar hasta la línea de costa ya que no existen barreras importantes (naturales o artificiales) que impidan el avance de los flujos.

La fluidez que ha caracterizado las lavas en las erupciones ocurridas en tiempos históricos y la topografía abrupta existente en la zona son otros factores que favorecen esta situación. Esta impresión se ve además corroborada por el antecedente que supone la erupción en 1706 de Montaña Negra (situado cerca del lugar en el que se disponen nuestros centros de emisión), que alcanzó la villa de Garachico destruyéndola parcialmente.

En la erupción que hemos simulado en las laderas Sur de la isla (caso III, figura 7.9) la posibilidad de alcanzar la línea de costa disminuye ya que, en plena trayectoria de las lavas y en la proximidad del punto emisor se encuentra Arona, cuyo núcleo urbano es lo bastante denso e importante como para actuar como barrera frente al avance de las coladas.

Sin embargo, la trayectoria occidental (que es además la que el modelo ha clasificado como más probable) podría llegar a alcanzar la costa si se produjese una combinación favorable de ratio de emisión, duración del fenómeno y fluidez de las lavas. La topografía, que en esta zona está todavía caracterizada por la existencia de fuertes pendientes, es otro factor que puede contribuir favorablemente a la progresión de las lavas.

El escenario más improbable es sin duda el que corresponde a la erupción simulada en las estribaciones de la dorsal de La Esperanza (caso II). En éste, la presencia de la localidad de La Laguna en plena trayectoria de las coladas, la escasa pendiente existente en el área en la que se asienta este núcleo y la presencia, en dirección hacia el mar, de un área fuertemente urbanizada que crea un tejido urbano casi continuo, convierten en altamente improbable la llegada de las coladas hasta Sta. Cruz de Tenerife.

Solamente la emisión de un gran volumen de lava o el mantenimiento de un ratio de emisión elevado durante un intervalo de tiempo prolongado podría favorecer la llegada de las coladas hasta la costa. Sin embargo, estas condiciones no se han presentado en las erupciones que han tenido lugar en tiempos históricos en la isla, por lo que en principio no cabría esperar que pudiesen llegar a darse en el futuro.

Se observa por tanto que, dependiendo de la zona de la isla en la que se desarrolle el fenómeno estudiado, varían las condiciones necesarias para que éste alcance su máxima magnitud (representada en nuestro caso por la llegada de las coladas a la costa), siendo sus

efectos potenciales completamente distintos incluso cuando se ha utilizado un criterio homogéneo para realizar la simulación.

La verosimilitud o posibilidad de que cada uno de los escenarios generados se desarrolle de acuerdo con los cálculos obtenidos, se puede utilizar como factor de ponderación a la hora de interpretar los resultados que se hemos obtenido en la evaluación del riesgo.

Para el primer caso seleccionado (caso I), los resultados obtenidos por la evaluación se pueden considerar como verosímiles. Estos sitúan el mayor impacto derivado de la erupción sobre las líneas vitales, con el corte en tramos importantes de su trazado de los canales principales de abastecimiento y depuración de agua y la red de carreteras (figuras 7.2 y 7.3).

La disposición de las coladas de acuerdo con dos trayectorias de probabilidad equivalente podría tener como consecuencia, en el caso de que ambas llegasen a desarrollarse, un fuerte impacto sobre la población residente en un elevado número de núcleos urbanos. Esta situación se vería agravada por el aislamiento en el que podría quedar inmersa el área de Teno, con el corte de los suministros a los numerosos núcleos de población existentes en esta zona.

Otro efecto que podría alcanzar una importante magnitud en este caso es el de los incendios que pudiesen originarse en la zona forestal en la que se sitúa el origen de las coladas. Las condiciones de difícil accesibilidad de la mayor parte de estas zonas en la isla podría dificultar seriamente su control y favorecer su extensión hacia áreas adyacentes.

Para la erupción simulada en la dorsal de La Esperanza los resultados obtenidos por el modelo indican que el impacto de las lavas se concentraría sobre los usos urbanos e industriales, a los que corresponde más del 80% de la superficie total que invadirían las lavas. La población afectada alcanza la cifra más elevada de los tres casos (figura 7.6).

Los efectos también se extenderían sobre el comercio y las comunicaciones de la isla. El aeropuerto de Los Rodeos es la vía principal de acceso de viajeros desde la península y el resto de las islas del archipiélago y el puerto de Sta. Cruz representa la conexión marítima con las islas occidentales del archipiélago (principalmente Gran Canaria) y la fuente principal de entrada de mercancías marítimas a la isla.

Si se revisan estos resultados considerando que es más probable que las lavas quedasen retenidas en el área de La Laguna, la magnitud global del impacto se ve sensiblemente disminuida. Aunque sobre esta población el efecto sería todavía muy importante (resultarían afectadas por efecto directo de las coladas unas 20.000 personas), gran parte de las vías de comunicación, distribución de agua y usos industriales quedaría fuera de su alcance.

Sin embargo, es conveniente no olvidar la presencia en las proximidades del centro de emisión del aeropuerto de Los Rodeos, que se vería afectado en cualquier caso y cuya destrucción parcial podría tener importantes repercusiones económicas.

Para la erupción simulada en la laderas S de la isla (caso III) los resultados obtenidos sitúan el mayor impacto sobre el sector turístico. A pesar de que núcleos de población importantes como Arona se encuentran localizados en plena trayectoria de las lavas, la repercusión más negativa sobre la economía de la isla se derivaría de la afección que pudiese llegar a tener lugar en localidades como Playa de Las Américas, Los Cristianos y Las Galletas.

Además de estos efectos destacaría también la interrupción de las redes de comunicaciones y de las líneas principales de abastecimiento de agua y electricidad (figura 7.9). Las pérdidas potenciales de las líneas vitales no llegarían, sin embargo, a ser tan importantes ni a tener consecuencias tan negativas sobre la población como las que resultarían del desarrollo de la erupción simulada en el caso I.

Al revisar estos resultados suponiendo que es más probable que las lavas quedasen retenidas en Arona, la situación resultante es bastante más favorable. La población total afectada se reduciría casi en un 90%, la mayoría de las redes viarias y líneas de abastecimiento no llegarían a verse afectadas por las lavas y tampoco los complejos turísticos costeros, con lo que nos enfrentaríamos sin duda al caso en el que los efectos directos alcanzan una magnitud menor.

En el caso de que las lavas pudiesen llegar a la zona de costa siguiendo la trayectoria de mayor probabilidad (la occidental), sería necesario disponer de información adicional para establecer con mayor precisión los efectos que se derivarían de la invasión de las coladas en la zona donde se concentran los complejos turísticos.



Tanto en éste como en el segundo de los casos un efecto indirecto que podría provocar daños graves es el de la aparición de incendios en las áreas urbanas. La existencia de materiales altamente inflamables en muchos de los edificios unida a la posibilidad de que se produzcan cortocircuitos favorecería el que pudiesen originarse numerosos focos difíciles de controlar que podrían provocar la extensión del área afectada.

De acuerdo con este análisis, todo parece indicar que es el primero de los casos estudiado el que tiene una mayor probabilidad de producirse en el futuro. La localización de los centros de emisión en un área de elevada probabilidad espacio-temporal, la existencia de unas trayectorias claras por las que discurrirían las lavas, la posibilidad de que éstas lleguen a alcanzar la línea de costa y el número y tipo de elementos bajo riesgo identificados convierten a éste en el escenario en el que estaría representado el mayor riesgo potencial de los tres.

En el segundo de los escenarios, la elevada posibilidad de que la acción de las lavas se vea limitada al área de La Laguna, unida a la menor probabilidad de ocurrencia del mismo y a la menor repercusión de sus efectos directos (excepto por la presencia del aeropuerto de Los Rodeos) e indirectos, indica la existencia de un menor riesgo potencial.

Por último, el tercero de los escenarios es el que representaría el caso menos probable y con un nivel más bajo de pérdidas, suponiendo que las coladas quedasen retenidas en la zona de Arona.

## **CONCLUSIONES**

---

## **VIII. Discusión de los Resultados**

---

## VIII. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Al examinar en detalle los resultados obtenidos en el capítulo anterior, observamos que existe un conjunto de circunstancias que han condicionado sus características. Estas circunstancias las hemos clasificado y agrupado en tres categorías según tengan su origen en:

- (1) las condiciones de implementación que hemos fijado para llevar a cabo la realización del estudio piloto,
- (2) los elementos que componen el modelo cartográfico implementado y
- (3) las herramientas que hemos utilizado para obtener la evaluación del riesgo.

En los apartados que se desarrollan a continuación hemos examinado, en relación con la fuente de la que proceden, las circunstancias que han condicionado en cada caso los resultados obtenidos y hemos analizado la forma en la que éstas han contribuido a la expresión final del riesgo potencial.

### VIII.1. En relación con las condiciones de implementación.

Las condiciones de implementación o planteamientos sobre los que hemos llevado a cabo el estudio piloto son los que sin duda han influido de forma más directa sobre los resultados obtenidos.

La dedicación del estudio piloto a la evaluación del riesgo procedente de erupciones de tipo efusivo básico en Tenerife y, más en concreto, de los efectos que se derivan de la emisión de lavas en estas erupciones, ha concentrado nuestro análisis sobre una sola clase de fenómenos del total que conforma el amplio abanico de manifestaciones que han tenido lugar en la isla, si bien es ésta la que ha sido más frecuente a lo largo de su historia eruptiva.

Esta condición ha determinado la forma en la que hemos llevado a cabo la implementación del modelo cartográfico diseñado, restringiendo su uso y el propósito para el cual puede ser utilizado. Sin embargo, la aplicación de este enfoque no significa que la implementación del modelo no haya sido completa.

De hecho, para llevar a cabo la evaluación del riesgo hemos tenido que integrar igualmente en el GIS todas las variables que participan en el riesgo y desarrollar los procedimientos necesarios para el funcionamiento del modelo, sólo que no necesitamos integrar todas las bases de datos volcanológicas y del medio físico, debido a la relativa simplicidad que caracteriza la simulación de estos fenómenos en comparación con otros.

Al haber representado los tres factores que intervienen en el riesgo, la estructura de cálculo que hemos integrado en el GIS resulta válida para comprobar la funcionalidad del modelo cartográfico. Esta estructura presenta además la ventaja de que proporciona una base válida en caso de que se desee ampliar el sistema en fases posteriores con la incorporación de otros modelos físicos de simulación y bases de datos hasta abarcar todos los fenómenos que tienen lugar en la isla.

En lo que respecta al método que hemos seguido para llevar a cabo la evaluación, actualmente existe una gran variedad de ellos para analizar las posibles consecuencias de un evento determinado, con el fin de establecer planes adecuados de prevención y gestión de catástrofes o, a nivel más general, para definir las pautas por las que se debe regir la planificación territorial en áreas expuestas a las mismas.

Los métodos más ampliamente utilizados comprenden desde los que se basan en la aplicación de cálculos numéricos que intentan reproducir los fenómenos estudiados (p.e. modelos a escala, modelos analógicos o simulaciones en ordenador) a los que, utilizando una serie de reglas lógicas intentan, a partir de unas condiciones de partida establecidas, explorar la posible evolución de un evento (p.e. método de los escenarios, técnica Delphi, técnica de simulacros). Todos estos métodos son complementarios, por lo que su potencial se multiplica cuando se combinan unos con otros (Alexander, 1993).

Así, en nuestro caso, los modelos físicos han proporcionado la posibilidad de reproducir el comportamiento del fenómeno estudiado. Al integrarlos en un contexto en el que se tiene en cuenta el resto de las variables que definen el riesgo, hemos generado una forma de simular los efectos que se pueden derivar de un evento determinado, obteniendo información sobre las zonas que pueden verse afectadas y los elementos que podrían quedar inutilizados.

La simulación utilizando ordenadores se ha utilizado ya en otros campos para proporcionar la visión general que se necesita al elaborar planes de prevención (Carrol, 1983; Sullivan & Newkirk, 1989) y se puede utilizar para establecer zonas de peligro, contribuyendo al diseño de planes de evacuación eficientes.

Sin embargo, las técnicas de simulación numérica requieren para su aplicación el que se conozcan por anticipado las condiciones bajo las que se desarrolla el evento. Salvo si la simulación se ejecuta en el momento que tiene lugar el evento (gestión de crisis), se desconocen con precisión los valores que adoptarán los parámetros que intervienen en el proceso y, en este caso, la simulación no puede proporcionar información sobre los resultados a que conducen los cambios que se produzcan en las condiciones de partida o en la evolución.

El método de los escenarios (Borchardt, 1991) se ocupa precisamente de establecer la correspondencia o relación que existe entre las condiciones de partida y el futuro, utilizando unas "reglas del juego" que puede adoptar del modelo diseñado para llevar a cabo la simulación numérica (modelo cartográfico).

La versatilidad obtenida al incorporar al modelo cartográfico la capacidad para realizar ensayos de todo tipo que caracteriza al método de los escenarios, ha proporcionado en nuestro estudio la base para que sea posible comparar las circunstancias que se derivarían de la ocurrencia de un mismo tipo de evento en distintas zonas de la isla. De la misma manera, aunque no hayamos contemplado esta posibilidad en nuestro estudio, esta combinación de métodos proporciona la posibilidad de comparar, para un mismo punto de emisión, los efectos derivados de que se produzcan cambios en las condiciones de simulación.

Para que sea posible desarrollar un escenario, éste se debe apoyar en un conjunto de hipótesis de partida que deben obedecer a un cierto número de reglas y ser:

- transparentes, para que sea fácil apreciarlas
- verosímiles, lo que no significa que no puedan reflejar un cierto grado de azar
- coherentes a todos los niveles, tanto en sí mismas como entre ellas
- pertinentes en función del objetivo que se persiga con su aplicación
- suficientes para cubrir una gran gama de posibilidades sin incurrir en redundancias

La coherencia indispensable en la elección de las hipótesis debe además mantenerse a lo largo del desarrollo del escenario o escenarios que deseemos estudiar, lo que implica que éstas siempre deben aplicarse en las mismas condiciones.

En el estudio que hemos presentado en el capítulo anterior el objetivo fijado ha sido el de comparar los efectos potenciales que se derivarían de que se produjera un mismo tipo de evento (en nuestro caso la emisión de lavas procedentes de erupciones de tipo efusivo básico) en distintas zonas de la isla.

La coherencia necesaria que deben mantener las hipótesis sobre las que se han de generar los escenarios sólo se puede asegurar si en el proceso de selección de las mismas se tienen en cuenta las características del modelo cartográfico a implementar. Es decir, existe un mecanismo de retroalimentación (*feedback*) entre ambos. Sobre esta base, las hipótesis que hemos utilizado son las siguientes:

- el o los centros de emisión se pueden localizar en cualquier punto que se encuentre situado dentro de los límites del área en la que existe probabilidad de que se produzcan eventos del tipo que se va a analizar.
- el evento representado puede llegar a alcanzar su máxima magnitud, lo que hemos traducido a la hora de realizar la simulación como la posibilidad de que las lavas puedan llegar a alcanzar la línea de costa independientemente del punto de emisión.
- las características reológicas de las lavas y el resto de factores que determinan el área por la que éstas se distribuyen permiten que se cumpla la condición anterior.

La primera hipótesis planteada se apoya en los resultados obtenidos al analizar la distribución de centros y estilos eruptivos en la isla (véase capítulo VI).

En cuanto a la segunda y tercera hipótesis, su formulación ha estado en gran medida influida por las limitaciones de cálculo que presenta el modelo físico de simulación implementado, las cuales presentamos en detalle en el siguiente apartado, y son las que aportan un mayor grado de indeterminación a los resultados.

Su elección se ha apoyado sobre el hecho de que, aunque en período histórico la mayor parte de las erupciones no haya alcanzado las proximidades de la línea de costa, esto no significa necesariamente que no exista posibilidad de que pueda ser éste el caso en el futuro, como se deduce de la distribución que presentan este tipo de depósitos en el registro geológico.

Sin embargo, la necesidad de que, para que se cumpla esta condición, el conjunto de factores que intervienen en el desarrollo del fenómeno (principalmente el ratio de emisión, la duración de la erupción y las características reológicas de las lavas) deban ser favorables, ha hecho necesario analizar en cada uno de los casos estudiados el grado de verosimilitud de los resultados obtenidos.

Este análisis, además de que ha permitido establecer unos límites a los resultados, es interesante porque proporciona información sobre lo previsible que resulta la situación que se deriva de la generación del escenario. El hecho de que dos de los casos analizados se hayan revelado como menos verosímiles no significa necesariamente que sean imposibles o impensables, sino que indica la posibilidad de que se produzcan "sorpresas" o azares (catástrofes) a las que los sistemas serán tanto más vulnerables cuanto menos previsibles sean los resultados.

El que se pueda presentar este tipo de situaciones pone de manifiesto que no hay que atribuir una importancia excesiva a las cifras obtenidas al aplicar el modelo ni una precisión ilusoria. El interés de los resultados reside, principalmente, en que se ponen en evidencia los elementos que pueden condicionar y controlar la evolución de un sistema y, sobre todo, en la posibilidad de comparar las consecuencias que se producen en función de que se presente cierta evolución. Los escenarios proporcionan por tanto un marco de reflexión sobre el futuro que permite comprender las consecuencias que se derivan de ciertas condiciones de partida.

Otro factor que es necesario tener en cuenta a la hora de ponderar las cifras que proporciona la aplicación del modelo cartográfico, es la escala de trabajo seleccionada para llevar a cabo el estudio. La escala de trabajo condiciona directamente la resolución de las bases de datos que se van a implementar en el modelo cartográfico y, en consecuencia, esta resolución se ha visto reflejada en los resultados que se han obtenido al aplicar el modelo.



La escala de trabajo parece haber sido la causa principal por la que los escenarios de riesgo obtenidos identifican trayectorias de probabilidad alta sólo cuando hay barreras topográficas claramente definidas y el motivo por el que no aparecen trayectorias de máxima probabilidad.

Esto puede haberse debido a que con la resolución a la que hemos trabajado para adaptarnos a esta escala (tamaño de píxel: 50 metros) el modelo digital no identifica las irregularidades del relieve que más influyen en la canalización de las coladas, por lo que el modelo físico no dispone de información suficiente para encontrar las trayectorias por las que, con un mayor grado de probabilidad, se canalizarán los flujos.

La utilización de un DEM de mayor resolución originaría dos problemas: (1) el incremento en los tiempos de cálculo del modelo y de las necesidades de almacenamiento y (2) la ruptura de la coherencia espacial que caracteriza al modelo cartográfico al introducir una base de datos de resolución distinta a la del resto. En consecuencia, para operar con el escenario de riesgo resultante, habría que remuestrear su tamaño de píxel perdiéndose en este paso la definición obtenida originalmente.

Por otra parte, el análisis de la información disponible sobre las erupciones históricas indica que la amplitud de las coladas pertenecientes a los intervalos superiores de probabilidad en los casos analizados no se diferencia en gran medida de las de éstas (por ej. en el Chinyero las coladas alcanzaron 200 m de amplitud y en Garachico las coladas se llegaron a extender por una superficie mucho mayor), por lo que los resultados del modelo no parecen entrar, *en principio*, en conflicto con estos datos.

La influencia de la escala de trabajo se ha hecho notar también en las cifras obtenidas en la estimación del riesgo potencial para los elementos bajo riesgo considerados en el cálculo, lo que reafirma el carácter estimativo de los resultados.

La escala de trabajo ha quedado expresada al implementar el modelo cartográfico por el tamaño de píxel que hemos utilizado para representar las bases de datos. La resolución adoptada implica que la parcela más pequeña de superficie que podemos obtener como resultado de los cálculos del modelo es del orden de 0,25 ha (2500 m<sup>2</sup>), cantidad que es importante tener en cuenta al estimar la precisión que proporcionan los datos obtenidos.

En resumen, el análisis de la influencia que ejerce cada una de las tres condiciones fijadas para implementar el modelo sobre los resultados obtenidos al generar los escenarios nos ha permitido conocer los límites dentro de los cuales se debe llevar a cabo su interpretación.

La selección de un tipo de fenómeno concreto sobre el que realizar el análisis y la elección del método de los escenarios para llevar a cabo el estudio han determinado el tipo de aplicación al que va a ser posible destinar el modelo, pero no ejercen por sí mismos influencia sobre las características que van a adoptar los resultados. Las hipótesis que se han utilizado al desarrollar los escenarios y la escala de trabajo son, de hecho, los planteamientos que han condicionado los resultados obtenidos, por lo que su conocimiento y comprensión son fundamentales a la hora de interpretar las cifras que proporciona el modelo.

### **VIII.2. En relación con los elementos que componen el modelo cartográfico.**

Son dos los elementos que componen el modelo cartográfico implementado que han ejercido influencia sobre los resultados de la evaluación: las características de las bases de datos que hemos utilizado en el cálculo y los procedimientos diseñados para extraer la información.

En lo que respecta a las bases de datos, la mayor dificultad con la que nos hemos enfrentado a la hora de evaluar el riesgo potencial es la existencia en ellas de registros incompletos, como por ejemplo la información relativa al número de viviendas y de habitantes por vivienda en ciertos núcleos urbanos o la identificación de algunas carreteras. Estas circunstancias han aparecido reiteradamente en los tres casos para los que hemos llevado a cabo la evaluación.

Esta situación tiene su origen en la distinta procedencia de los datos, que ha hecho en muchos casos imposible la identificación de equivalencias entre datos que el modelo utiliza de forma complementaria para obtener una información determinada (como la localización de núcleos y estadísticas de población para obtener el número de personas afectadas por el fenómeno).

La existencia de diversas fuentes de información también ha planteado problemas a la hora de integrar los datos espaciales. La localización del archipiélago canario y el régimen administrativo particular que lo caracteriza motiva que, dependiendo de la fuente de la que procedan los datos, el sistema de referencia utilizado sea distinto.

Así, la cartografía elaborada por entes de ámbito estatal, como el Mapa Topográfico Nacional o el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos utilizan como meridiano de referencia para las coordenadas geográficas el de Greenwich, aunque en otros casos, como el Mapa Geológico serie MAGNA se utiliza el de Madrid. En el caso de la cartografía del Cabildo, los datos están referenciados a un datum con su origen en cada una de las islas.

Para integrar todos los datos en el GIS hay que utilizar un marco de referencia común y, aunque la transformación de unos sistemas de referencia a otros se conoce, en el proceso se puede introducir un cierto error de posicionamiento que, aunque mínimo, es deseable evitar.

Otra característica de las bases de datos utilizadas es su grado de actualización. Algunas de ellas (p.e. los datos volcanológicos) proporcionan datos de los que no es necesario que exista una actualización reciente. Sin embargo, esto sí es deseable para los datos socioeconómicos, ya que los cambios que experimentan son mucho más dinámicos. Lo mismo ocurre con el DEM, pues cualquier modificación en la topografía (bien con su origen en la actividad volcánica o en cualquier otro tipo de fenómeno natural o antrópico) influye sobre los escenarios que genera el modelo.

De las bases de datos utilizadas es la relativa a los usos de suelo la menos actualizada. La disponibilidad de imágenes del sensor Landsat 5 TM (con una resolución espacial de 30 m y temporal de 16 días) lo convierte en una herramienta idónea para la actualización de estos datos. Sin embargo, la falta de imágenes para el período en el que hemos abordado el estudio ha impedido su utilización con este fin.

En cuanto a las bases de datos socioeconómicas utilizadas para calcular el riesgo potencial, sólo hemos recurrido a una muestra representativa del total que caracterizan la realidad de la isla aunque, en fases posteriores de desarrollo, se deben incluir nuevos datos (p.e. turismo, industria, líneas eléctricas, telefónicas, etc.) o completar los existentes.

Tanto para este propósito como para conseguir el grado de actualización deseable y el marco común de referencia pueden resultar de gran utilidad los datos generados para el "*Proyecto Anaga*" del Cabildo Insular de Tenerife.

Sin embargo, es necesario considerar que la escala de trabajo de este proyecto es 1:5.000, lo que proporciona un nivel de detalle muy superior al utilizado en este estudio, por lo que, tanto para incorporar estos datos como cualquier otro de elevada resolución, será necesario hacer una selección previa de la información a incorporar al sistema.

Por lo que respecta a la vulnerabilidad de los elementos bajo riesgo, no existe información precisa sobre la forma más correcta de adquirir la información sobre la accesibilidad y el tiempo de llegada ni sobre cómo se combinan con la susceptibilidad de los elementos bajo riesgo, por lo que hemos excluido estas dos variables del cálculo.

El principal propósito de estas variables es el de establecer el grado de susceptibilidad de cada uno de los elementos bajo riesgo frente a los efectos indirectos que se generan como resultado de la interacción del fenómeno considerado con el medio. Al no haberlas incluido en el cálculo, el modelo sólo tiene en cuenta en el cálculo los efectos directos del fenómeno sobre los elementos bajo riesgo.

Para las coladas de lava, se considera que la vulnerabilidad de la población por efecto directo de las lavas es del 0%, mientras que la del resto de los elementos que han intervenido en el cálculo es del 100%. En el caso concreto de la población, los resultados del estudio han puesto de manifiesto sin embargo la importancia que pueden adquirir también los efectos indirectos representados por las otras dos variables en el caso de tener que adoptar medidas para la evacuación de los núcleos urbanos.

Así, aunque intuitivamente se puede interpretar a partir de los resultados el riesgo procedente de efectos indirectos (situaciones de caos en procesos de evacuación, potencial de propagación de incendios, etc.), sería conveniente disponer de datos de tipo cuantitativo (aunque sólo sean válidos a nivel indicativo) sobre el riesgo derivado de éstos.

Esta situación hace necesario profundizar en el análisis y conocimiento de los efectos indirectos que se pueden derivar en función de las características que adoptan ambas variables, no sólo para las coladas (que a primera vista parece plantear el tipo más simple de interacción), sino también para el resto de los fenómenos volcánicos.

La extensión del modelo a otros fenómenos requiere también una mayor investigación sobre los efectos directos que cada uno de ellos ejerce sobre los elementos bajo riesgo ya que, excepto para las coladas, no existe un estándar de amplia utilización que permita atribuir un porcentaje de pérdidas para determinados elementos. Este es el caso, por ejemplo, de los usos de suelo agrícolas y forestales cuando se ven sometidos a lluvias piroclásticas.

En cuanto a los procedimientos diseñados para llevar a cabo la implementación, son dos las observaciones principales que se pueden hacer en lo que se refiere al condicionamiento que han ejercido sobre los resultados del estudio.

Como ya hemos presentado en el capítulo VI, el modelo físico de simulación (entendido como módulo para la generación de escenarios de riesgo) que se ha implementado para realizar el estudio piloto considera la topografía como factor principal en la distribución de las coladas.

En este tipo de modelos no se puede especificar el ratio de emisión en el punto seleccionado como origen del cálculo ni se considera el tiempo que necesitan los flujos para propagarse, por lo que simplemente se muestran las trayectorias más probables que seguiría un fluido que circulase libremente desde el punto de emisión (Macedonio, 1996). Tampoco tienen en cuenta las modificaciones que se producen en la topografía a lo largo de la erupción ni la posibilidad de que se puedan generar tubos de lava que permitan la llegada de las coladas a puntos lejanos del centro de emisión.

A pesar de ello, su aplicación no presenta problemas cuando se conoce a priori la longitud máxima que van a alcanzar los flujos de lava, pero en casos como el que nos ha ocupado, en el que el interés reside en conocer la extensión máxima que éstos pueden llegar a alcanzar, es necesario recurrir a las características de los eventos que se han presentado previamente en la zona de estudio para analizar la verosimilitud de los resultados que proporcionan.

Existen otros modelos para la simulación bidimensional de flujos de lava como el de Barca et al. (1993), que utilizan para la simulación una serie de parámetros con los que se refleja el ratio de emisión y las propiedades reológicas de las lavas. Sin embargo, éstos tienen como inconveniente que necesitan grandes estaciones de trabajo para realizar los cálculos y tiempos elevados para llevar a cabo la simulación, por lo que aún están lejos de ser operativos.

Otra característica de los procedimientos de cálculo que condiciona los resultados obtenidos en el estudio es la forma en la que se ha evaluado el riesgo potencial a partir de los elementos bajo riesgo. Para obtener esta información hemos mantenido siempre la independencia de los elementos, para que sea posible conocer la procedencia de los valores obtenidos. La principal desventaja de este enfoque reside en el volumen de información que se genera cada vez que se realiza un ensayo, lo que puede complicar la comparación de los datos.

Existen dos opciones principales que se pueden plantear para unificar los resultados. La primera se serviría de índices que representasen el valor en conjunto de los elementos bajo riesgo existentes en la zona de estudio. Un ejemplo de estos índices es el nivel de renta o el producto interior bruto. La segunda consistiría en obtener el valor monetario que representan las pérdidas potenciales de cada uno de los elementos identificados.

El principal inconveniente que introducen ambos métodos es el de la falta de transparencia de los resultados. En el segundo de los casos esta situación se ve agravada por la dificultad que supone asignar a cada elemento, en función de su clase y categoría, el valor económico que representa, sin mencionar el incremento en la complejidad de los procesos de cálculo que se deriva de esta opción. Por estos motivos, hemos preferido expresar los resultados obtenidos de cada elemento de forma independiente.

### **VIII.3. En relación con las herramientas de trabajo.**

Los GIS se han seleccionado como herramienta de trabajo para la implementación de la metodología por su capacidad para manejar de forma eficiente múltiples bases de datos y realizar operaciones complejas de análisis espacial como las que requiere la evaluación del riesgo volcánico.

Como resultado de la realización del estudio piloto, observamos que los GIS han contribuido a que se cumplan las dos condiciones clave que se plantearon en las hipótesis de trabajo (véase capítulo I): (1) han proporcionado el marco dinámico necesario para que sea posible llevar a cabo la generación de escenarios y (2) la creación de un marco de referencia común ha permitido obtener información sobre la distribución y características de los fenómenos objeto de estudio, necesaria para evaluar el riesgo en un contexto espacial coherente.

Otra característica de los GIS que ha aportado un elevado grado de dinamismo a la evaluación del riesgo es la velocidad con la que se obtienen los resultados. Esta condición depende, además de la eficiencia con la que se hayan implementado los procedimientos que utiliza el modelo, del tipo de plataforma (hardware) que sirva de base para la ejecución del programa.

En el caso de un Pc standard (486 o Pentium) el tiempo necesario para generar los mapas y las tablas de resultados a partir del escenario de riesgo es del orden de un minuto. A esto hay que añadir el tiempo que necesita el modelo para generar el escenario, lo que depende de la complejidad de la topografía, la distancia que recorren las lavas y el número de iteraciones deseadas, aunque también suele ser bastante reducido.

El principal problema que nos hemos encontrado al implementar el modelo cartográfico es la falta de conexión completa entre los tres módulos de cálculo que lo componen, especialmente en el paso de parámetros de simulación del primero al segundo de ellos.

Esta situación no ha supuesto ningún problema para la generación de los escenarios en el estudio piloto, debido a las restricciones con las que se ha implementado el modelo, pero es deseable que, más adelante, las interfases entre módulos se desarrollen adecuadamente.

El diseño actual de herramientas más sofisticadas en el entorno Windows (p.e. la versión 2.0 de ILWIS) puede ser la clave para la completa integración de los modelos así como para el diseño de menús de usuario, que no ha sido necesario implementar en esta fase de desarrollo, pero que son imprescindibles si se pretende abarcar la amplia gama de opciones de simulación y la integración de los distintos tipos de fenómenos volcánicos.

Otra característica que ha influido en los resultados y que procede del software que hemos utilizado como base de trabajo (ILWIS) es el modo en el que se realizan las operaciones de análisis espacial.

En el capítulo III hemos presentado las ventajas e inconvenientes que supone almacenar las bases de datos en modo ráster o vectorial en función del tipo de operaciones que es posible realizar con las mismas. El modo ráster es sin duda el que proporciona una mayor capacidad para la realización de las operaciones que requiere la evaluación del riesgo.

El almacenamiento de la información en este formato implica que la cuantificación que se lleva a cabo para cada uno de los elementos utiliza un procedimiento de "conteo" de píxeles afectados por el fenómeno, que resulta adecuado cuando se trata de estimar superficies pero que introduce un nivel de error para elementos lineales como las carreteras.

Esto significa que, como cada píxel equivale en nuestro caso a una superficie de 50 x 50 metros, cuando el elemento que representa el píxel es de tipo areal (por ej. núcleos de población), el cálculo de la superficie a la que corresponde es directo ( $1 \text{ píxel} = 2.500 \text{ m}^2$ ).

Sin embargo, en elementos de tipo lineal un píxel puede superar, al menos en una de las dos direcciones del espacio representadas, las dimensiones reales del objeto que representa. Suponiendo que la trayectoria en el espacio que representa el píxel fuera recta y que el elemento lo atravesase por completo, la longitud mínima representada sería de 50 m y la máxima de aproximadamente 70,7 m (en diagonal).

Conocer la longitud precisa representada en cada uno de los píxeles resulta imposible a priori, por lo que, de acuerdo con la hipótesis de máxima magnitud, hemos asignado a cada uno de ellos la distancia de 70,7 metros. Esta cantidad ha podido dar lugar a que los resultados obtenidos para las redes viarias se hayan visto incrementados con respecto a la realidad, lo que los convierte en los menos fiables de todos. Sin embargo, hemos preferido incluirlos en el cálculo porque a pesar del posible error cometido, proporcionan una buena base a la escala de trabajo para comparar la magnitud de los efectos en las distintas carreteras afectadas.

Este problema es el que tiene un carácter más complejo de todos los que hemos analizado a lo largo de este capítulo. Su solución se podría obtener mediante la realización de todos los cálculos relacionados con infraestructuras lineales en modo vectorial utilizando técnicas de análisis topológico. Sin embargo, la complejidad que conlleva la realización de este tipo de análisis y el incremento considerable que puede suponer en los tiempos de cálculo son los motivos principales por los que no hemos contemplado esta opción en el estudio.



## **IX. Resumen y Conclusiones**

---

## IX. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El desarrollo de una metodología de trabajo para la evaluación del riesgo volcánico ha constituido el objetivo fundamental de este estudio. Su carácter innovador ha residido en el tipo de aproximación con el que hemos abordado el análisis del riesgo, buscando la fusión entre las metodologías tradicionales de cálculo y unas herramientas informáticas de última generación destinadas a la gestión de datos geográficos de todo tipo.

La revisión de los trabajos que guardan alguna relación con el riesgo volcánico ha puesto de manifiesto el predominio de los estudios dirigidos al análisis de una componente concreta del mismo, aunque son los que se ocupan de investigar todos aquellos aspectos que guardan alguna relación con la peligrosidad los que sin duda son más frecuentes tanto a nivel internacional como nacional (véase cap. II).

Pese los pocos estudios que se han ocupado de desarrollar una línea de trabajo en riesgo volcánico en su sentido más amplio, se aprecia perfectamente como resultado de esta revisión que la evaluación del riesgo es una tarea que requiere la aplicación de un enfoque multidisciplinar capaz de integrar las diferentes perspectivas adoptadas para el análisis de los factores de los que depende.

Esta revisión ha puesto también de manifiesto el elevado número de variables que intervienen en la estimación del riesgo, lo que tradicionalmente ha desembocado en el desarrollo de procedimientos de trabajo complejos y laboriosos que varían de unos estudios a otros dependiendo de los objetivos que se persigan, por lo que carecemos de un estándar de uso general que permita comparar los resultados obtenidos.

Una forma de evitar esta "dispersión" de métodos y enfoques es mediante la adopción de herramientas que proporcionen la capacidad de realizar de forma automática el análisis del riesgo, cuyo uso esté lo bastante extendido como para garantizar su utilización y que faciliten el diseño de unos procedimientos de cálculo que, con adaptaciones mínimas, permitan su aplicación a cualquier área volcánica.

La aplicación con éxito de los Sistemas de Información Geográfica en otras disciplinas, unida a su probada capacidad para la gestión eficiente de múltiples bases de datos y la realización de numerosas operaciones de todo tipo, ha sido la razón fundamental que nos ha impulsado a utilizarlos como base para el desarrollo de la metodología.

El desarrollo de la metodología ha estado marcado, por tanto, por los principios que usualmente se siguen para diseñar aplicaciones GIS, caracterizados por utilizar procedimientos "escalonados" (*stepwise*) en los que, gradualmente, se van definiendo con mayor detalle cada uno de los componentes que han de formar parte del sistema (véase cap. III).

Esta filosofía se ha reflejado en la estructuración del trabajo en varias partes con objetivos diferentes, pero interconectadas y dependientes, las cuales nos han conducido, como resultado, a alcanzar el objetivo global que nos hemos planteado al realizar el estudio.

El cuerpo central y clave del estudio lo ha constituido la elaboración de un modelo cartográfico, cuyo diseño hemos abordado en el capítulo IV. En este modelo hemos recogido tanto la solución propuesta en el capítulo I para superar los obstáculos a los que se enfrentan las metodologías tradicionales como los criterios básicos a que debe ajustarse la metodología para alcanzar un nivel de operatividad aceptable.

El diseño del modelo de acuerdo con estos criterios no garantiza por sí mismo su efectividad, por lo que, para comprobarla, lo hemos aplicado a la evaluación del riesgo en un área de trabajo concreta (Tenerife, islas Canarias) cuyas características la convierten en un campo de experimentación idóneo.

Los procedimientos que se ocupan de hacer posible la evaluación del riesgo procedente de los diversos tipos de fenómenos volcánicos difieren básicamente en el número y tipo de variables que intervienen en la simulación y en las características de los modelos necesarios para realizarla.

Cada grupo de procedimientos destinados a la evaluación del riesgo procedente de un tipo determinado de fenómeno se identifica en terminología GIS con un "subsistema" que forma parte del "sistema global" para el análisis del riesgo.

Cuando nos enfrentamos a casos como el de Tenerife, con la coexistencia de varios tipos de fenómenos en el espacio y el tiempo, es una práctica común en GIS implementar uno solo de los subsistemas que compondrán, en última instancia, la aplicación. En nuestro caso, el subsistema elegido ha sido el dedicado a la evaluación del riesgo frente a coladas lávicas, debido a la facilidad de implementación que presenta frente a otro tipo de fenómenos (véase el subcapítulo dedicado a las Condiciones de Implementación).

La implementación "parcial" constituye un paso lógico imprescindible antes de desarrollar el sistema por completo, ya que permite verificar el diseño del modelo y localizar los puntos débiles o conflictivos que conviene depurar o mejorar antes de embarcarnos en esta labor.

Para implementar el modelo de forma correcta es importante conocer previamente, con un nivel de detalle equiparable a la escala de trabajo seleccionada, la realidad geológica, física y social del área de estudio. El análisis de las características más significativas que influyen de forma directa o indirecta sobre el riesgo lo hemos abordado brevemente a lo largo del capítulo V. Esta fase sirve también de ayuda para conocer el grado y tipo de elaboración que requiere la incorporación de los datos que formarán parte del sistema.

La implementación de las bases de datos necesarias para la evaluación del riesgo y la generación de los procedimientos de cálculo (véase cap. VI) nos ha permitido realizar una serie de ensayos (generación de escenarios de riesgo) para comparar los efectos potenciales que se derivarían de la ocurrencia de una erupción con su origen en distintos puntos de Tenerife, con el objeto de comprobar la funcionalidad del modelo cartográfico diseñado (véase cap. VII).

Las condiciones que hemos establecido para la implementación del modelo han influido de forma clave sobre el tipo y características de los resultados obtenidos (véase Capítulo VIII). El tipo de implementación seleccionado (generación de escenarios de riesgo a escala regional) ha resaltado la utilidad del modelo en la elaboración de planes de prevención y evacuación a nivel insular, la búsqueda de emplazamientos idóneos para los recursos de apoyo y la identificación de instalaciones altamente peligrosas o estratégicas situadas en áreas de riesgo potencial elevado.

La dedicación del estudio a una aplicación específica no elimina sin embargo la posibilidad de que en el futuro podamos desarrollar módulos con una función o propósito diferente del actual o a una escala mayor de la que hemos seleccionado para realizar el estudio piloto.

Las características de las bases de datos implementadas y los procedimientos diseñados para realizar el estudio piloto son lo que, en segundo orden de magnitud, han condicionado los resultados obtenidos por la aplicación del modelo. El carácter abierto de la metodología nos ha permitido seleccionar la forma en la que hemos decidido expresar las variables que intervienen en el cálculo y adaptar los procedimientos a sus características.

Por último, la versatilidad de la tecnología seleccionada para servir de plataforma en la implementación de la metodología nos ha permitido obtener resultados de forma rápida y eficaz y mantener los márgenes de error dentro de unos límites tolerables.

Del examen global de los resultados del estudio se pueden extraer las siguientes **CONCLUSIONES** sobre la utilidad de la metodología diseñada y de los Sistemas de Información Geográfica como herramientas de trabajo para la evaluación del riesgo volcánico:

- 1) La metodología cumple las condiciones necesarias para su aplicación con éxito a la evaluación del riesgo incluso en áreas caracterizadas por la distribución compleja de fenómenos y proporciona los medios para que ésta sea posible haciendo un uso eficiente de aquellas variables que estén disponibles para el cálculo.
- 2) La estructura del modelo cartográfico permite aplicarlo a la generación de escenarios de riesgo que identifican las áreas más susceptibles de verse afectadas por el fenómeno volcánico, lo que tiene importantes implicaciones desde el punto de vista de la Protección Civil, que se incrementan si se tiene en cuenta la posibilidad que también existe de generar información a tiempo real en caso de crisis.
- 3) Los Sistemas de Información Geográfica, han demostrado ser una herramienta no sólo de gran utilidad en la gestión y tratamiento eficiente de un gran volumen de datos, sino también capaces de proporcionar los medios para realizar los ensayos que puedan resultar necesarios para el análisis del riesgo volcánico.

- 4) La capacidad de almacenamiento y gestión de datos de los GIS podría ser aprovechada para incorporar al sistema datos procedentes de redes instrumentales de seguimiento, las cuales proporcionan información sobre los niveles "base" de actividad volcánica y que pueden servir como medio para estimar el grado de "inminencia" de los fenómenos volcánicos.
- 5) El comportamiento satisfactorio que ha presentado la metodología en la evaluación del riesgo frente a coladas lávicas en la isla de Tenerife proporciona una base firme para llevar a cabo la implementación total del modelo, que se traduce en la generación de dos líneas de trabajo principales:
  - el estudio del riesgo procedente de los otros fenómenos volcánicos que pueden tener lugar en la isla de Tenerife.
  - su aplicación a otras áreas volcánicas activas con objeto de determinar la posibilidad de establecer un procedimiento de trabajo estándar en riesgo.
- 6) Existen sin embargo varios puntos clave en el proceso de cálculo del riesgo sobre los que se necesita profundizar para conseguir una estimación más precisa del mismo:
  - el estudio de la susceptibilidad de los elementos bajo riesgo frente a los fenómenos volcánicos (por sus efectos directos e indirectos), la influencia que ejerce cada una de las variables que la definen sobre el valor de la vulnerabilidad y el procedimiento que se debe seguir para obtenerla.
  - la investigación sobre las variables que influyen en la exposición, la forma en la que contribuyen a la misma y el efecto que éstas ejercen sobre el riesgo potencial.
  - el desarrollo de procedimientos que permitan integrar completamente los modelos físicos en el entorno GIS y la incorporación de cálculos que mejoren su precisión, aprovechando los continuos avances que se producen hoy en día en el campo de la programación.

## **Referencias Bibliográficas**

---

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdel-Monem, A., Watkins, N. & Gast, P. (1972).- *Potassium-argon ages, volcanic stratigraphy and geomagnetic polarity history of the Canary Islands: Tenerife, La Palma and Hierro*. Am. Jour. Sci. 272, pp. 805-825.
- Ablay, G.J., Ernst, G.G.J. & Martí, J. (1995).- *The ~2 Ka subplinian eruption of Montaña Blanca, Tenerife*. Bull. Volcanol. 57, pp. 337-355.
- Acosta, J., Herranz, P., Muñoz, A., Palomo, C., Sanz, J.L. & Uchupi, E. (1996).- *Perfiles sísmicos en el margen insular de Tenerife: Proyecto Teide. Resultados Preliminares*. Geogaceta 20, pp. 335-338.
- Alexander, D. (1993).- *Natural disasters*. UCL Press. 632 pp.
- Alonso, J.J. (1986).- *Riesgo volcánico explosivo en Canarias*. En: V. Araña (ed.) **Riesgo Volcánico**. Seminario de la UIMP, Sta. Cruz de Tenerife. pp. 88-100.
- Alonso, J.J. (1989).- *Estudio volcanoestratigráfico y volcanológico de los piroclastos sálicos del sur de Tenerife*. Tesis doctoral. Univ. de La Laguna, 356 pp.
- Ancochea, E., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Coello, J., Hernán, F., Cantagrel, J.M., Jamond, C. & Cendrero, A. (1989).- **Cronoestratigrafía de las series antiguas de Tenerife**. E.S.F. meeting on Canarian Volcanism. Lanzarote, 367 pp.
- Anchochea, E., Fúster, J.M., Ibarrola, E., Cendrero, A., Coello, J., Hernán, F. Cantagrel, J.M. & Jamon, C. (1990).- *Volcanic evolution of the island of Tenerife (Canary Islands) in the light of new K-Ar data*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 44, 213-249.
- Ancochea, E., Brändle, J.L. & Huertas, M.J. (1995).- *Alineaciones de centros volcánicos en la isla de Tenerife*. Geogaceta 17, pp. 56-59.
- Araña, V. (1971).- *Litología y estructura del Edificio Cañadas, Tenerife (Islas Canarias)*. Estudios Geológicos XXVII, pp. 95-135.
- Araña, V. (1988a).- *Riesgo Volcánico en el área de Santiago del Teide*. En: **Memoria Geológica de la Hoja 1110-IV, Santiago del Teide (1:25.000)**. ITGE, Madrid. 91 pp.



- Araña, V. (1995).- *Notes on Canarian Volcanism*. En: J. Martí & J. Mitjavila (eds.) **A field guide to the central volcanic complex of Tenerife (Canary Islands)**. Serie Casa de Los Volcanes nº 4, pp. 3-17.
- Araña, V. & Brändle, J.L. (1969).- *Variation trends in the alkaline salic rocks of Tenerife*. Bull. Volcanol. 33, 1145-1165.
- Araña, V. & Carracedo, J.C. (1978).- **Los Volcanes de las islas Canarias. vol. I Tenerife**. Ed. Rueda. 151 pp.
- Araña, V. & Coello, J. (eds.) (1989).- **Los volcanes y la Caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)**. ICONA, Serie Técnica nº 7, 443 pp.
- Araña, V. & Ortiz, R. (1986).- *Marco geodinámico del volcanismo canario*. Anales de Física, serie B, nº 82, pp. 202-231.
- Araña, V. & Ortiz, R. (1993).- *Riesgo volcánico*. En: J. Martí & V. Araña (eds.) **La Volcanología Actual**. Colección Nuevas Tendencias vol. 21, CSIC, pp. 277-385.
- Araña, V. & Ortiz, R. (1996).- *Introducción*. En: R. Ortiz (ed.) **Riesgo Volcánico**. Serie Casa de los Volcanes nº 5, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, pp. 1-36.
- Araña, V., Martí, J., Aparicio, A., García-Cacho, L. & García-García, R. (1994).- *Magma mixing in alkaline magmas: An example from Tenerife (Canary Islands)*. Lithos 32, pp. 1-19.
- Ardizzone, J.A., Arozarena, A., Delgado, J., Herrero, M., Villa, G. & Vivas, P. (1991).- *El Programa Corine. Proyecto Land Cover. Una metodología aplicada a las Islas Canarias*. Proc. IV Reunión Científica de la Asoc. Esp. de Teledetección, pp. 234-237.
- Aronson, P. (1985).- *Applying software engineering to a general purpose geographic information system*. Proc. Autocarto 7. ASPRS, Falls Church (Virginia, USA), pp. 23-31.
- Baker, P.E. (1985).- *Volcanic hazards on St Kitts and Montserrat, West Indies*. Jour. Geol. Soc. London 142, pp. 279-295.
- Barberi, F., Macedonio, M., Pareschi, M.T. & Santacroce, R. (1990).- *Mapping the tephra fallout risk: an example from Vesuvius, Italy*. Nature 344, pp. 142-144.

- Barberi, F., Ghigliotti, M., Macedonio, G., Orellana, H., Pareschi, M.T. & Rosi, M. (1992).- *Volcanic hazard assessment of Guagua pichincha (Ecuador) based on past behaviour and numerical models*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 49, pp. 53-68.
- Barberi, F., Carapezza, M.L., Valenza, M. & Villari, L. (1993).- *The control of lava flows during the 1991-1992 eruption of Mt. Etna*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 56, 1-34.
- Barberi, F., Carapezza, M.L., Macedonio, G. & Massone, S. (1995).- *Hazard Map of Mount Etna based on past activity and numerical simulation*. Per. Mineral. 64, pp. 87-88.
- Barca, D., Crisci, G.M., Di Gregorio, S. & Nicoletta, F.P. (1993).- *Cellular automata method for modelling lava flows: simulation of the 1986-1987 eruption, Mount Etna, Sicily*. En: C.R.J. Kilburn & G. Luongo (eds.) **Active lavas: monitoring and modelling**. UCL Press (Londres), pp. 291-309.
- Björnsson, A., Saemundsson, K., Einarsson, P., Tryggvason, E. & Grönvold, K. (1977).- *Current rifting episode in North Iceland*. Nature 266, pp. 318-323.
- Blong, R.J. (1984).- **Volcanic Hazards: A source-book on the effects of eruptions**. Orlando (Florida): Academic Press, 424 pp.
- Bocco, G. (1990).- **Gully Erosion Analysis Using Remote Sensing and Geographic Information Systems. A case study in Central Mexico**. Tesis. ITC (Holanda), 130 pp.
- Booth, B. (1979).- *Assessing volcanic risk*. Jour. Geol. Soc. London 136, pp. 331-340.
- Booth, B. (1984).- *Cartographic representation of volcanic hazards. Examples: Tenerife*. En: D.R. Crandell, B. Booth, K. Kusumadinata, D. Shimozuru, G.P.L. Walker & D. Westercamp (eds.) **Source-book for volcanic hazards zonation**. UNESCO, pp. 67-72.
- Boots, B.N. & Getis, A. (1988).- **Point pattern analysis**. SAGE publications. 93 pp.
- Borchardt, G. (1991).- *Preparation and use of earthquake planning scenarios*. California Geology 44, pp. 195-203.
- Brass, A., Wadge, G. & Reading, A.J. (1991).- *Designing a GIS for the prediction of landsliding potential in the West Indies*. En: J. Cosgrove & M. Jones (eds.) **Neotectonics and Resources**, London: Belhaven Press, pp. 220-230.

Bravo, T. (1980).- **Riesgo de erupciones volcánicas en las Canarias**. Univ. de La Laguna. Informe para la D.G. de Protección Civil. 6 pp.

Bryan, S. (1995).- *The Bandas del Sur pyroclastics*. En: J. Martí & J. Mitjavilla (eds.) **A field guide to the central volcanic complex of Tenerife (Canary Islands)**. Serie Casa de los Volcanes nº 4, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, pp. 39-46.

Burrough, P.A. (1986).- **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Monographs on Soil and Resources Survey nº 12. Oxford Science Publications, 194 pp.

Carey, S. & Sigurdsson, H. (1989).- *The intensity of plinian eruptions*. Bull. Volcanol. 51, pp. 28-40.

Carey, S. & Sparks, R.S.J. (1986).- *Quantitative models of the fallout and dispersal of tephra from volcanic eruption columns*. Bull. Volcanol. 48, pp. 109-125.

Carracedo, J.C. (1988).- *El riesgo volcánico*. En: **Riesgos Geológicos**. Serie Geología Ambiental. Pub. Inst. Geol. Minero de España, Madrid, pp. 83-97.

Carracedo, J.C. (1993).- *Volcanismo activo y medio ambiente en las Islas Canarias*. Tierra y Tecnología 6, pp. 61-70.

Carracedo, J.C., Soler, V., Rodríguez Badiola, E. & Hoyos, M. (1990).- *Zonificación de riesgo para erupciones de baja magnitud en la isla de Tenerife*. IV Reunión Nal. de Geología Ambiental y Ordenación del Territorio (Gijón), pp. 65-72.

Carrasco-Nuñez, G. & Galicia, C. (1995).- *Volcanic hazard assessment of the Orizaba area, Eastern Mexico*. Per. Mineral. 64, pp. 117-118.

Carrol, J.M. (ed.) (1983).- **Computer simulation in emergency planning**. La Jolla (California): Society for Computer Simulation.

Cheminee, J.L, Boudon, G., Dagain, J., Rançon, J.P., Semet, M.P. & Traineau, H. (1995).- *Volcanic hazard in the French Antilles*. En: T.H. Jones, A. Amendola & R. Casale (eds.) **Natural Risk and Civil Protection**. E&FN SPON, pp. 96-115.

Coello, J. (1989).- *Marco geológico regional del Teide y Las Cañadas*. En: V. Araña & J. Coello (eds.) **Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)**. ICONA, Serie Técnica nº 7, pp. 45-63.

Coello, J. & Bravo, T. (1989).- *Alineamientos volcano-tectónicos en la región central de Tenerife*. En: V. Araña & J. Coello (eds.) **Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)**. ICONA, Serie Técnica nº 7, pp. 127-135.

Comisión Nacional de Emergencia Gobierno de Costa Rica (1995).- **Sistema de Información para Emergencias. Aspectos Generales**. 14 pp.

Connor, C.B. (1987a).- *Structure of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, Mexico*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 33, pp. 191-200.

Connor, C.B. (1990).- *Cinder Cone Clustering in the TransMexican Volcanic Belt: Implications for Structural and Petrologic Models*. Jour. of Geophys. Res. 95, nº B12, pp. 19395-19405.

Cook, R.J., Barron, J.C., Papendick, R.I. & Williams, G.J.III (1981).- *Impact on Agriculture of the Mount St. Helens Eruption*. Science 211, pp. 17-22.

Coppock, J.T. & Rhind, D.W. (1991).- *The history of GIS*. En: D.J. Maguire, M.J. Goodchild & D.W. Rhind (eds.) **Geographical Information Systems: Principles and Applications** (2 vols.), Londres: Longman & New York: Wiley, pp. 21-43.

Cowen, D.J. (1988).- *GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?*. Phot. Eng. and Remote Sensing 54, pp. 1551-1554.

Crandell, D.R. & Mullineaux, D.R. (1978).- **Potential hazards from future eruptions of Mount St. Helens Volcano, Washington**. U.S. Geol. Surv. Bull. 1383-C, 26 pp.

Crandell, D.R., Booth, B., Kusumadinata, K., Shimozuru, D., Walker, G.P.L. & Westercamp, D. (eds.) (1984).- **Source-book for volcanic-hazards zonation**. UNESCO, 97 pp.

De la Cruz-Reyna, S. (1991).- *Poisson-distributed patterns of explosive eruptive activity*. Bull. Volcanol. 54, pp. 57-67.

De la Cruz-Reyna, S. (1993).- *Random patterns of occurrence of explosive eruptions at Colima Volcano, Mexico*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 55, pp. 51-68.

De la Nuez, J., Alonso, J.J., Quesada, M.L. & Macau, M.D. (1993).- *Edificios hidromagmáticos costeros de Tenerife (Islas Canarias)*. Rev. Soc. Geol. España 6 (1-2), pp. 47-59.

Del Negro, C.; Cristaldi, M. & Ferrucci, F. (1995).- *Continuous magnetic measurements: the computation of the piezomagnetic field expected at Mt. Etna (Italy)*. Per. Mineral 64, pp. 161-162.

Diggle, P.J. & Milne, R.K. (1983).- *Bivariate Cox processes: some models for bivariate spatial point patterns*. Jour. R. Stat. Soc., Serie B nº45, pp. 11-21.

Dobran, F., Barberi, F. & Casarosa, C. (1990).- **Modeling of volcanological processes and simulation of volcanic eruptions**. CNR Gruppo Naz. Volcanol. Italia. Report VSG90-01, 85 pp.

Dobran, F., Neri, A. & Todesco, M. (1994).- *Assessing the pyroclastic flow hazard at Vesuvius*. Nature 367, pp. 551-554.

El País-Aguilar (ed.) (1993).- **Atlas de España**. vol. 2, pp 114-125.

Fedra, K. (1990b).- **Interactive environmental software: integration, simulation and visualization**. Laxenburg (Austria): Int. Inst. for Applied Systems Analysis.

Fedra, K. & Reitsma, R.F. (1990).- *Decision support and geographical information systems*. En: H.J. Scholten & J.C.H. Stillwell (eds.) **Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, pp. 177-186.

Felpeto, A., García, A. & Ortiz, R. (1996).- *Mapas de riesgo. Modelización*. En: R. Ortiz (ed.) **Riesgo Volcánico**. Serie Casa de los Volcanes nº 5, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, pp. 67-98.

Fournier d'Albe (1979).- *Objectives of volcanic monitoring and prediction*. Jour. Geol. Soc. London 136, pp. 321-326.

Frazzeta, G. & Romano, R. (1979).- **The volcanic risk in the Etnean area**. CNR I.I.V. - Catania. Progetto Finalizzato Geodinamica - Pubbl. n. 235, Napoli.

Fúster, J.M., Araña, V., Brändle, J.L., Navarro, M., Alonso, U. & Aparicio, A. (1968).- **Geología y volcanología de las islas Canarias: Tenerife**. Instituto "Lucas Mallada", CSIC (Madrid), 218 pp.

Fytikas, M. & Vougioukalakis, G. (1995).- *Volcanic hazards in the Aegean Islands*. En: T. Horlick-Jones, A. Amendola & R. Casale (eds.) **Natural Risk and Civil Protection**. E&FN SPON, pp. 117-130.

García Moral, R. (1989).- *Erupciones históricas en Tenerife*. En: V. Araña & J. Coello (eds.) **Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)**. ICONA, Serie Técnica nº 7, pp. 235-249.

Gatrell, A. & Dunn, C. (1990).- *GIS in epidemiological research: analyzing cancer of the larynx in North West England*. Proc. EGIS '90, Utrecht: EGIS Foundation.

Goodchild, M.F. (1987).- *A spatial analytical perspective on geographic information systems*. Int. Jour. of Geographical Information Systems 1, pp. 327-334.

Goodchild, M.F. (1993).- *The State of GIS for Environmental Problem-Solving*. En: M.F. Goodchild, B.O. Parks & L.T. Steyaert (eds.) **Environmental Modeling with GIS**. Oxford Univ. Press, pp. 8-15.

Gorte, B. & Koolhoven, W. (1990).- *Interpolation between isolines based on the Borgefors distance transform*. ITC Journal 1990-3, pp. 245-247.

Granger, K.J. (1989).- *Process modelling and geographic information systems: breathing life into spatial analysis*. Proc. of Eighth Biennial Conf. and Bushfire Dynamics Workshop, Canberra, ACT, Australia. Australian Nat. Univ., pp. 37-341.

Guest, J.E. & Murray, J.B. (1979).- *An analysis of hazard from Mount Etna Volcano*. Jour. Geol. Soc. London 136, pp. 347-354.

Gupta, R.P. & Joshi, B.C. (1990).- *Landslide hazard zoning using the GIS approach - a case study from the Ramganga catchment, Himalayas*. Eng. Geology 28, pp. 119-131.

Haralick, R.M. (1980).- *A spatial data structure for geographic information systems*. En: H. Freeman & G.G. Pieroni (eds.) **Map and data processing**. Nueva York: Academic Press.

Hédervári, P. (1963).- *On the energy and magnitude of volcanic eruptions*. Bull. Volcanol. 25, pp. 373-385.

Herd, D.G. & Comité de Estudios Volcanológicos (1986).- *The 1985 Ruiz Volcano disaster*. Eos Trans. AGU, 67, pp. 457-460.

Hobblit, R.P., Miller, C. Dan & Scott, W.E. (1987).- **Volcanic hazards with regard to siting nuclear-power plants in the Pacific Northwest**. U.S. Geol. Survey Bull. 1383-C, 25 pp.

Hulme, G. (1974).- *The interpretation of lava flow morphology*. Geophys. Jour. R. Astr. Soc. nº 39, pp. 361-383.

IAVCEI (1990).- *Reducing volcanic disasters in the 1990's*. Bull. Volcanol. Soc. Japan, ser. 2, vol. 35, nº 1, pp. 80-95.

IDNDR Committee (1991).- **Report on the first session of the IDNDR Scientific and Technical Committee**. Bonn, 4-8 March.

INIA (1977).- **Agroclimatología de España**. Instituto Nacional de Infraestructuras Agrarias.

Jackson, M.J., James, W.J. & Stevens, A. (1988).- *The design of environmental geographic information systems*. Phil. Trans. R. Soc. London A324, pp. 373-380.

Johnson, R.W. (1988).- *Volcanic hazards and aviation*. Proc. Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes, pp. 662-665.

Klein, F.W. (1982).- *Patterns of historical eruptions at Hawaiian volcanoes*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 12, pp. 1-35.

Lam, D.C.L. & Swayne, D.A. (1991).- *Integrating database, spreadsheet, graphics, GIS, statistics, simulation models and expert Systems: experiences with the Raison system on microcomputers*. NATO ASI Series, G26, Heidelberg: Springer, pp. 429-459.

Larson, R. & Pitman, W. (1972).- *World-wide correlation of Mesozoic magnetic anomalies, and its implications*. Geol. Soc. Am. Bull. 83, pp. 3645-3662.

Latter, J.H. (1986).- *Volcanic risk and surveillance in New Zealand*. En: **Volcanic Hazard Assessment in New Zealand**. Int. Volc. Congress. New. Zeal. Geol. Surv. Rec. 10, pp. 5-26.

Lowenstein, P.L. (1982).- **Problems of volcanic hazards in Papua New Guinea**. Geol. Surv. of Papua-New Guinea Report 82/7, 62 pp.

Macedonio, G. (1996).- *Modeling lava flow hazard*. En: F. Barberi, R. Casale & R. Fantechi (eds.) **The mitigation of volcanic hazards. Proceedings of the course**. European Commission. pp. 89-95.

Macedonio, G. & Pareschi, M.T. (1992).- *Numerical simulation of some lahars from Mount St. Helens*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 54, pp. 65-80.

Maguire, D.J. & Dangermond, J. (1991).- *The functionality of GIS*. En: D.J. Maguire, M.J. Goodchild & D.W. Rhind (eds.) **Geographical Information Systems: Principles and Applications** (2 vols.), London: Longman & New York: Wiley, pp. 319-335.

Mallarach, J.M. & Martí, J. (1987).- *El risc volcànic a la Garrotxa. Primeres aportacions*. Vitrina 2, pp. 26-32.

M.A.P.A. (1988).- **Mapa de Cultivos y Aprovechamientos de Tenerife**. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Mapa y memoria explicativa. 179 pp.

Marble, D.F. & Peuquet, D.J. (1983).- *Geographic Information Systems*. En: R.N. Colwell (ed.) **Manual of Remote Sensing**. 2nd. ed., Am. Soc. of Photogrammetry, Falls Church, pp. 923-958.

Martí, J., Mitjavila, J. & Araña, V. (1994a).- *Stratigraphy, structure and geochronology of the Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands)*. Geological Magazine 131, pp. 715-727.

Martí, J., Araña, V., Ablay, G., Bryan, S., Mitjavila, J., Raposo, S., Pujadas, A. & Romero, C. (1994c).- *Caracterización de la actividad eruptiva en Tenerife durante los últimos 200.000 años*. En: A. García & A. Felpeto (eds.) **In Memoriam Dr. José Luis Díez Gil**, Serie Casa de los Volcanes nº 3, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, pp. 157-178.

Martí, J., Mitjavila, J. & Araña, V. (1995).- *The Las Cañadas Edifice and caldera*. En: J. Martí & J. Mitjavila (eds.) **A field guide to the central volcanic complex of Tenerife (Canary Islands)**, Serie Casa de los Volcanes nº 4, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, pp. 19-38.

Martínez de Pisón, E. & Quirantes, F. (1990).- *El Relieve de Canarias*. En: C. Romero (ed.) **Jornadas de Campo sobre Geomorfología Volcánica**. Soc. Esp. de Geomorfología. Monografía nº 5, pp. 3-76.

Marzol, M<sup>a</sup> V. (1990).- *La estabilidad atmosférica en Canarias*. En: C. Romero (ed.) **Jornadas de Campo sobre Geomorfología Volcánica**. Soc. Esp. de Geomorfología. Monografía nº 5, pp. 256-261.

Massone, S., Pareschi, M.T. & Santacroce, R. (1996).- *Il SIT Informatico dell'Area Circumvesuviana. Un ausilio per scenari di rischio vulcanico*. Centro di Studio per la Geologia Strutturale e Dinamica dell'Appennino. Rapp. Tecnico CSGSDA/CNR 96.1, 20 pp.

Mezcua, J., Ortiz, R., Bufo, E., Galán, J., Herraiz, M., Martínez Solares, J.M., Rueda, R. &



Sánchez Venero, M. (1989).- *Estudio de la actividad sísmica en la isla de Tenerife*. En: V. Araña & J. Coello (eds.) **Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide** (Tenerife, Islas Canarias). ICONA, Serie Técnica nº 7, pp. 397-403.

Miller, C. Dan (1988).- *Development of volcanic-hazard-zonation maps for the Cascade Range, Northwestern United States*. Proc. Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes, pp. 400-403.

Miller, C. Dan (1989).- **Potential Hazards from Future Volcanic Eruptions in California**. U.S. Geol. Survey Bull. 1847, 17 pp.

Mullineaux, D.R., Peterson, D.W. & Candrell, D.R. (1987).- *Volcanic hazards in the Hawaiian islands*. En: R.W. Decker, T.L. Wright & P.H. Stauffer (eds.) **Volcanism in Hawaii**. U.S. Geol. Survey Prof. Paper. 1350, pp. 599-621.

Muñoz, A., Acosta, J., Herranz, P., Palomo, C., Sanz, J.L. & Uchipi, E. (1996).- *Batimetría multihaz del margen insular de Tenerife (Islas Canarias): Proyecto Teide-95*. Geogaceta 20, vol. 2, pp. 339-342.

Newhall, C.G. & Self, S. (1982).- *The Volcanic Explosivity Index (VEI): An Estimate of Explosive Magnitud for Historical Volcanism*. Jour. of Geophys. Res. 87, nº C2, pp. 1231-1238.

Ortiz, R., Alguacil, G., Olmedillas, J.C, García, A. & Felpeto, A. (1995).- *Teide Decade Volcano: development of instrumentation for volcano monitoring*. Per. Mineral 64, pp. 53-54.

Palomo, C., Acosta, J., Uchupi, E., Herranz, P., Muñoz, A. & Sanz, J.L. (in press).- *Morphometric interpretation of the Northwest and Southeast slopes of Tenerife (Canary Islands)*. Jour. Geoph. Res.

Pascual, G., Carreño, E. & Martín, A.J. (1994).- **Microzonación sísmica basada en un Sistema de Información Geográfica. Zona de Estudio Granada y su entorno. Módulo I, Licuefacción**. MOPTMA - IGN. Publicación técnica nº 28.

Parent, P. & Church, R. (1989).- *Evolution of geographic information systems as decision making tools*. En: W.J. Ripple (ed.) **Fundamentals of Geographic Information Systems: A Compendium**. Bethesda, MD: American Soc. Photogr. and Remote Sensing, pp. 9-18.

Pareschi, M.T. & Berstein, R. (1989).- *Modeling and image processing for visualization of volcanic mapping*. IBM Jour. Res. Develop. 33, nº 4, pp. 406-416.

Peterson, D.W. (1988).- *Hazards from lava flows and tephra falls*. Proc. Kagoshima Int. Conf. on Volcanoes, pp. 384-387.

Pitman, W. & Talwani, M. (1972).- *Seafloor spreading in the North Atlantic*. Bull. Geol. Soc. Am. 83, pp. 619-646.

Plan Hidrológico Insular de Tenerife (1989).- **Avance: Bases para el planeamiento hidrogeológico**. Cabildo Insular de Tenerife, 133 pp.

Reyment, R.A. (1969).- *Statistical Analysis of some Volcanologic Data*. PAGEOPH 74(III), pp. 57-77.

Ridley, W.I. (1970).- *The petrology of the Las Cañadas volcanoes, Tenerife, Canary Islands*. Contribution to Mineralogy and Petrology 26, pp. 124-160.

Ridley, W.I. (1971).- *The origin of some collapse structures in the Canary Islands*. Geol. Magazine 108, pp. 477-484.

Rita, C. de, Giordano, G., Rosa, C. & Sheridan, M.F. (1995).- *Volcanic hazard at the Alban Hills and computer simulations*. En: R. Triglia (ed.) **The Volcano of the Alban Hills**, pp. 266-283.

Rivas Martín, S. (1987).- **Mapa de las Series de Vegetación de España: 29 - Sta. Cruz de Tenerife**. Serv. de Publicaciones. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Escala 1:400.000.

Romero, C. (1991).- **Las manifestaciones volcánicas históricas del Archipiélago Canario**. Tesis Doctoral, Departamento de Geografía, Univ. de La Laguna. Gobierno de Canarias (ed.). 2 vols., 1391 pp.

Sansón, J. (1996).- La protección civil ante el riesgo de erupciones volcánicas. En: R. Ortiz (ed.) **Riesgo Volcánico**. Serie Casa de los Volcanes nº 5, Servicio de Publicaciones del Cabildo de Lanzarote, pp. 197-216.

Scandone, R. (1979).- **Preliminary evaluation of the volcanic hazard in the Southern Valley of Mexico**. Geofísica Int. 18, nº 1, 35 pp.

Scandone, R. (1983).- *Problems related with the evaluation of volcanic risk*. En: H. Tazieff & J.C. Sabroux (eds.) **Forecasting Volcanic Events**. Amsterdam: Elsevier, pp. 57-67.

Schmincke, H. (1982).- *Volcanic and chemical evolution of the Canary islands*. En: von Rad, Hinz, Sarnthein & Seibold (eds.) **Geology of the NorthWest Africa Continental Margin**. Berlín: Springer-Verlag, pp. 273-306.

Scholten, J.J. & Stillwell, J.C.H. (eds.) (1990).- **Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning**. Dordrecht: Kluwer, 261 pp.

Slater, J., Hellinger, S. & Tapscott, C. (1977).- *The paleobatimetry of the Atlantic Ocean from the Jurassic to present*. Jour. Geology 85, pp. 509-552.

Scott, W.E. (1989).- *Volcanic-hazard zonation and long-term forecasts*. En: R.I. Tilling (ed.) **Volcanic Hazards**. Short Course in Geology: volume 1. American Geophysical Union, pp. 25-50.

Sekiya, S. & Kikuchi, Y. (1890).- *The eruption of Bandai-san*. J. Coll. Sci. Imp. Univ. Tokyo 3, pp. 91-172.

Settle, M. (1979).- *The structure and emplacement of cinder cone fields*. Am. Jour. Sci. 279, pp. 1089-1107.

Settle, M. & McGetchin, T.R. (1980).- *Statistical analysis of persistent explosive activity at Stromboli, 1971: implications for eruption prediction*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 8, pp. 45-58.

Shapiro, L.G. (1980).- *Design of a spatial information system*. En: H. Freeman & G.G. Pieroni (eds.) **Map and data processing**. Nueva York: Academic Press.

Shapiro, L.G. & Haralick, R.M. (1980).- *A spatial data structure*. GeoProcessing 1, pp. 313-397.

Smyrnew, J.M. (1990).- *Trends in geographic information systems technology*. Jour. of Surv. Engineering 116(2), pp. 105-111.

Spanner, M.A., Strahler, A.H. & Estes, J.E. (1983).- *Soil loss prediction in a geographic information system format*. Proc. 17th. Int. Sym. on Remote Sensing of Env., vol. 1. Ann Arbor (Michigan), pp. 81-102.

Stillwell, N.F., Hopkins, H.J. & Appleton, W. (1954).- **Tangiway railway disaster**. Report of the Board of Enquiry, Government Printer, Wellington.

Sucksdorff, Y., Lemmelä, R. & Keisteri, T. (1989).- *The environmental geographic information*

*system in Finland*. Proc. of the Baltimore Sym., pp. 427-434.

Sullivan, J. & Newkirk R.T. (eds.) (1989).- **Simulation in emergency management and technology**. La Jolla (California): Society for Computer Simulation.

Tazieff, H. (1977).- *An exceptional eruption: Mt. Nyiragongo, Jan. 10th., 1977*. Bull. Volcanol. 40 (3), pp. 1-12.

Thorarinsson, S., Steinthorsson, S., Einarsson, Th., Kristmannsottir, H. & Oakarsson, N. (1973).- *The eruption of Heimacy, Iceland*. Nature Lond. 241, pp. 372-375.

Tiedemann, H. (1992).- **Earthquakes and Volcanic eruptions. A Handbook on Risk Assessment**. Zurich: Swiss Re., 951 pp.

Tilling, R.I. (ed.) (1989).- **Volcanic Hazards. Short Course in Geology: volume 1**. American Geophysical Union, 198 pp.

Tilling, R.I., Rubin, M., Sigurdsson, H., Carey, S., Duffield, W. & Rose, W.I. (1984).- *Holocene eruptive activity of El Chichón Volcano, Chiapas, México*. Science 224, pp. 747-749.

Tomblin, J. (1986).- *Canary Islands: Volcanic risk evaluation, monitoring and emergency planning*. Ginebra: UNDRO.

Tomlin, C.D. (1991).- *Cartographic Modelling*. En: D.J. Maguire, M.F. Goodchild & D.W. Rhind (eds.) **Geographical Information Systems**, vol. 1, pp. 361-374.

Tomlinson, R.F. (1985).- *Geographic Information Systems - the new frontier*. The Operational Geographer 5, pp. 31-36.

Tsuya, H. (1955).- *Geological and petrological studies of Volcano Fuji, 5*. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ. 33, pp. 341-384.

UNESCO (1972b).- **Report of consultative meeting of experts on the statistical study of natural hazards and their consequences**. Document SC/WS/500, 11 pp.

UNDRO (1982).- **Natural disasters and vulnerability analysis**. Geneva: Office of the United Nations Disaster Relief Coordinator.

Valentine, G.A. & Crowe, B.M. (1995).- *The interplay between numerical simulation, field studies, and probabilistic modeling in volcanic risk assessment*. Per. Min. 64, pp. 285-287.

Valentine, G.A. & Wohletz, K.H. (1989).- *Environmental hazards of pyroclastic flows determined by numerical models*. Geology 17, pp. 641-644.

van Est, J.V. & de Vroege, F. (1985).- *Spatially oriented information systems for planning and decision making in the Netherlands*. Environ. and Planning B: Planning and Design 12, pp. 251-267.

Vieira, R. & Sevilla, M. (1989).- *Red geodésica de la Caldera de Las Cañadas*. En: V. Araña & J. Coello (eds.) *Los volcanes y la caldera del Parque Nacional del Teide (Tenerife, Islas Canarias)*. ICONA, Serie Técnica nº 7, pp. 423-426.

von Braun, M. (1993).- *The use of GIS in assessing the exposure and remedial alternatives at superfund sites*. En: M.F. Goodchild, B.O. Parks & L.T. Steyaert (eds.) **Environmental Modeling with GIS**. Oxford Univ. Press, pp. 332-338.

Wadge, G. (1988).- *The potential of GIS modeling of gravity flows and slope instabilities*. Int. Jour. of Geographical Inf. Systems 2(2), pp. 143-152.

Wadge, G. & Isaacs, M.C. (1988).- *Mapping the volcanic hazards from Soufriere Hills Volcano, Montserrat, West Indies using an image processor*. Jour. Geol. Soc. London 145, pp. 541-551.

Wadge, G., Wislocki, A.P. & Pearson, E.J. (1993).- *Spatial analysis in GIS for natural hazard assessment*. En: M.F. Goodchild, B.O. Parks & L.T. Steyaert (eds.) **Environmental Modeling with GIS**. Oxford Univ. Press, pp. 339-347.

Wadge, G., Young, P.A.V. & McKendrick I.J. (1994).- *Mapping lava flow hazards using computer simulation*. Jour. of Geophys. Res. 99, nº B1, pp. 489-504.

Walker, G.P.L. (1980).- *The Taupo pumice: product of the most powerful know (Ultraplilian) eruption?*. Jour. Volcanol. Geotherm. Res. 8, pp. 69-94.

Westercamp, (1984).- *Cartographic representation of volcanic hazards. Examples: French West Indies*. En: D.R. Crandell, B. Booth, K. Kusumadinata, D. Shimozuru, G.P.L. Walker & D. Westercamp (eds.) **Source-book for volcanic hazards zonation**. UNESCO, pp. 50-54.

Wickmann, F.E. (1966).- *Repose period patterns of volcanoes, I. Volcanic eruptions regarded as*

*random phenomena*. Ark. Mineral Geol. 4, pp. 291-301.

Wickmann, F.E. (1976).- *Markov models of repose-period patterns of volcanoes*. En: D.F. Merriam (ed.) **Random processes in geology**. Springer, Berlin-Heidelberg-New York, pp. 135-161.

Wiggins, J.C., Hartley, R.P., Higgins, M.J. & Whittaker, R.J. (1986).- *Computing aspects of a large geographic information system for the European Community*. Conf. Proc. of Auto Carto London, vol. 2, pp. 28-43.

Wolfe, E.W. (1992).- *The 1991 eruptions of Mount Pinatubo, Philippines*. Earthquakes and volcanoes 23, pp. 5-37.

Yanagi, T., Okada, H. & Ohta, K. (eds.) (1992).- **Unzen Volcano, the 1990-1992 eruption**. The Nishinippon and Kyushu Univ. Press, 137 pp.

Yokohama, I. (1957).- *Energetics in active volcanoes, 2nd paper*. Bull. Earthq. Res. Inst. Tokyo Univ. 35, pp. 75-97.



## GLOSARIO

**Algoritmo:** Conjunto de procedimientos definidos para la solución de un problema en un número limitado de pasos. Los algoritmos se implementan en un ordenador utilizando una secuencia programada de instrucciones.

**Aplicación:** Tarea llevada a cabo por un sistema informático.

**American Standard Code for Information Exchange (ASCII):** código estándar ampliamente utilizado para intercambiar datos alfanuméricos en aplicaciones informáticas.

**Atributo:** Información no gráfica asociada a un elemento puntual, lineal o areal representado en un GIS. Un atributo es una propiedad de una *entidad*, generalmente utilizada para hacer referencia a cualidades no espaciales de una entidad espacial. Por ejemplo, un código descriptivo que indique lo que representa la entidad o cómo debería ser interpretada.

**Base de datos:** Colección estructurada de información. La base de datos de un GIS incluye datos sobre la posición y los atributos de los elementos geográficos. Este término se utiliza también para designar bancos de datos y bases de datos comerciales.

**Batch:** serie de tareas que se ejecutan de forma sucesiva en un ordenador, sin la intervención humana.

**Celda:** elemento básico de información en el almacenamiento de entidades espaciales en modo ráster.

**Corrección Geométrica:** Conjunto de transformaciones realizadas sobre la imagen digital para eliminar los errores introducidos en la recogida de datos por el sensor.

**Datos espaciales:** Tipo de datos cuya naturaleza les asocia de forma inherente a una localización en el espacio. Se pueden representar como puntos, líneas o superficies. Utilizado en ocasiones como sinónimo de datos geométricos.

**Datum:** (1) cualquier cantidad numérica o geométrica o grupo de tales cantidades que pueden servir de referencia o base para medir otras cantidades. (2) Dirección, nivel o posición a partir de la que se miden convencionalmente los ángulos, profundidades, velocidades o distancias.

**Diseño:** Especificación lógica de las funciones que debe cumplir cada una de las partes de un sistema.



**Elemento:** unidad de información geográfica fundamental como un punto, línea, área o píxel. También se puede conocer como *entidad*.

**Entidad (geográfica):** Cosa (en nuestro caso objeto del medio físico o socioeconómico) de la cual se almacenan datos en un banco o base de datos. Por ej. usos del suelo, población, etc.

**Estructura de datos:** Organización lógica definida para los datos según se van a utilizar en un sistema para su gestión; representación de un modelo de datos en forma digital. También denominada *modelo lógico de datos*. En nuestro caso, equivale también al término *modelo cartográfico*.

**Falso color (composición):** Imagen obtenida por combinación de los valores en rojo, verde y azul asociados con cada píxel de una imagen digital, para las bandas espectrales seleccionadas.

**Filtro:** En el caso de ficheros en modo ráster, operación matemática que permite realzar o atenuar las variaciones que en ellos aparecen.

**GIS:** véase *Sistema de Información Geográfica*.

**Imagen:** Representación de una escena captada por teledetección espacial. Este término se restringe a aquella representación de los datos no obtenida por medios fotográficos.

**Imagen digital:** Representación de un objeto real mediante una matriz numérica bidimensional en la que cada elemento de la matriz corresponde a una parte del área del objeto representado.

**Información geográfica:** Información que se puede obtener de un elemento situado en la superficie de la Tierra, particularmente de fenómenos naturales, culturales o de recursos humanos. Caso especial de información espacial.

**Interactivo:** Sistema GIS en el que el operador puede iniciar o modificar la ejecución del programa y recibir información sobre el progreso del trabajo.

**Interfase:** Nexos que permiten conectar los subsistemas que componen un sistema o la comunicación de éste con los usuarios o los periféricos.

**Interpolación:** Estimación del valor que adquiere un atributo determinado en un punto en el que no disponemos de éste, calculado a partir de medidas que se hacen en puntos situados en su proximidad.

**Landsat:** Serie de satélites construidos por la NASA para estudiar los recursos naturales de la Tierra.

**Media móvil ponderada (algoritmo):** Valor calculado para un punto a partir de la media de los valores que adquieren los puntos que lo rodean, teniendo en cuenta como factor de peso su distancia o importancia.

**Menú:** Programa que se utiliza para informar al usuario de las opciones que tiene en una tarea determinada y solicitar instrucciones al respecto.

**Modelización:** (1) Representación de los atributos de la superficie de la Tierra en una base de datos digital; (2) Estudio de determinados procesos utilizando algoritmos matemáticos que se escriben en programas de ordenador.

**Modelo de datos:** Abstracción del mundo real que incorpora sólo aquellas propiedades consideradas como relevantes para la aplicación o aplicaciones a las que se destina. El modelo de datos define normalmente grupos de entidades específicos, sus propiedades y la relación que existen entre las entidades. Un modelo de datos es independiente del software en el que se implemente y las estructuras de datos que lo caractericen. También se utiliza el término *modelo conceptual de datos*.

**Modelo digital de elevación (DEM):** Modelo cuantitativo de la superficie terrestre en formato digital. También se llama Modelo Digital de Terreno: representación digital de una superficie.

**Modo ráster:** Malla regular de celdas que cubren un área.

**Modo véctor:** Codificación de datos de tipo lineal y superficial como unidades que expresan magnitud, dirección y conectividad.

**Módulo:** Pieza separada e independiente de hardware o software que se puede conectar a otras para formar un sistema. También se puede denominar subsistema.

**Parámetro:** Característica medible de los objetos o que se puede obtener a partir de una combinación de medidas.

**Picture element:** Par en el que el primer miembro indica una celda de una imagen digital y el segundo indica el valor digital que se le ha asignado.

**Píxel:** Contracción del término inglés *picture element*.

**Procedimiento de cálculo automático:** Utilización de cualquier tipo de automatización en el proceso de datos.

**Proceso de datos:** Aplicación de procedimientos mecánicos, eléctricos o digitales para transformar datos.

**Resolución espacial:** Dimensión más pequeña de los elementos objeto de estudio que puede ser discriminada u observada.

**Sensor (en teledetección):** Instrumento que capta la energía del espectro electromagnético y lo convierte a un formato adecuado para realizar análisis. Los pasivos utilizan la energía procedente de los objetos situados en la superficie de la Tierra. Los activos actúan como fuente de energía.

**Simulación:** Utilización de un modelo matemático para estudiar el resultado de uno o varios procesos.

**Sistema:** Conjunto organizado de cosas relacionadas o conectadas de tal forma que forman una unidad. Las partes que lo componen están clasificados u organizados de forma regular y ordenada que demuestra el plan lógico que las liga.

**Sistema de Información Geográfica:** Conjunto de herramientas destinado a la captura, almacenamiento, comprobación, integración, transformación, análisis y representación de datos que están espacialmente referenciados.

**Teledetección:** Capacidad de obtener información de un objeto sin mantener contacto físico con él. Se restringe a aquellas técnicas que utilizan la radiación electromagnética irradiada o emitida por los objetos.

**Thematic Mapper (TM):** Sensor de barrido multiespectral que incorporan los satélites Landsat 4 y 5. Capta información en 7 bandas espectrales.

**UTM:** Sistema de referencia Universal Transverse Mercator. Se trata de un sistema ortogonal que divide los meridianos de la Tierra, entre los 84° de latitud Norte y los 80° de latitud Sur, en una serie de husos, cada uno de 6° de amplitud. Cada huso se subdivide a su vez en áreas cuadradas de la misma forma y tamaño. Las coordenadas UTM se dan en metros.



## **Anexo A. Características Generales de ILWIS**

## A. CARACTERISTICAS GENERALES DE ILWIS

A finales de 1985, ITC (*International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences*) consiguió fondos del gobierno holandés para extender sus actividades de investigación a países en vías de desarrollo. En lugar de diseminarlos en varios proyectos pequeños, ITC decidió concentrar estos fondos en un único proyecto de investigación que proporcionaba un carácter multidisciplinar al estudio y de esta forma resaltaba la aplicabilidad de los resultados. Allard Meijerink dirigió la nueva investigación de ITC hacia la obtención de un Sistema de Información Geográfica para la identificación de usos de suelo y la gestión de recursos.

Durante varios meses este proyecto se conoció con el nombre de "*proyecto Sumatra*". Con el tiempo, el sistema en desarrollo adquirió un nombre propio: **Sistema de Información Integrado para la Tierra y el Agua** (*Integrated Land and Water Information System*). En el proceso de diseño y construcción se decidió que ILWIS debería ser capaz de:

- utilizar datos procedentes de mapas digitalizados (*datos vectoriales*)
- utilizar datos procedentes de sensores remotos (*datos raster*)
- incorporar o proporcionar la forma de conexión con aplicaciones descritas en publicaciones o disponibles en forma de programas de ordenador
- correr sobre ordenadores personales tipo PC o similar

En términos de gestión, estos requerimientos se tradujeron en la necesidad de incorporar:

- un sistema gestor de bases de datos flexible, capaz de manejar datos de tipo alfanumérico, el cual se seleccionó de entre los sistemas comerciales existentes.
- una base de datos vectorial y otra ráster que debían mantenerse independientes.

Para satisfacer estos requerimientos se diseñó y desarrolló un sistema que integra un variado número de herramientas para ejecutar procesos de tratamiento de imagen, análisis espacial, gestión de bases de datos y otros elementos comunes en casi todos los paquetes GIS.

### A.1. Componentes del software.

ILWIS se compone de los cinco módulos básicos de los que se consta cualquier paquete estándar de GIS (véase cap. III): módulo de entrada, almacenamiento, salida y transformación de datos y módulo de interacción con el usuario.

### A.1.1. *Entrada de datos.*

ILWIS incorpora un programa de conversión que permite importar y exportar datos digitales de tipo espacial o alfanumérico en varios formatos. Los datos analógicos se pueden incorporar al sistema utilizando un programa de digitalización específico, en el que la característica más destacada es la posibilidad de digitalizar sobre pantalla utilizando cualquier fichero ráster como imagen base.

### A.1.2. *Almacenamiento y gestión de datos.*

La eficiencia en el almacenamiento y gestión de los datos se consigue mediante la utilización de unos formatos específicos que son interconvertibles entre sí, de tal forma que resulta posible combinar y operar sobre datos de distinto tipo.

### A.1.3. *Salida de datos.*

ILWIS proporciona la posibilidad de generar salidas en varios formatos:

- por pantalla, especialmente para la visualización de los resultados de operaciones de cálculo o la preparación de otro tipo de salidas.
- en *hardcopy*, como impresiones en papel, película fotográfica, transparencias, etc. utilizando para ello periféricos como impresoras o plotters.
- en *softcopy*, como archivos almacenados en disco o diskette, cintas magnéticas o cualquier otro medio digital de almacenamiento útil para el intercambio de datos.

### A.1.4. *Análisis y transformación de datos.*

De todos los módulos, es éste el que proporciona a ILWIS la calificación de paquete analítico. La herramienta más potente que incluye es la dedicada a realizar operaciones de análisis espacial, con la que se pueden ejecutar procedimientos complejos de modelización en los que participen bases de datos tabulares y espaciales.

### A.1.5. *Interacción con el usuario.*

Para el diseño de ILWIS se tuvo en cuenta que no todos los usuarios tienen un conocimiento profundo sobre el manejo de ordenadores. Por ello, todas las operaciones se llevan a cabo haciendo uso de menús de fácil interpretación (*user-friendly*), lo que permite a los usuarios concentrarse en la aplicación que desean desarrollar sin necesidad de tener un profundo conocimiento del mismo.

## A.2. Representación de datos en ILWIS.

ILWIS almacena los datos geográficos en forma de mapas y los atributos asociados a éstos como tablas. En función del tipo de entidad espacial que representan y de la estructura que se utilice para almacenarla (modo vectorial o ráster), ILWIS distingue entre los siguientes tipos de mapas:

- mapas de puntos
- mapas de segmentos
- mapas de polígonos
- mapas ráster

Para localizar estos elementos en el espacio, se utiliza una proyección y un sistema de coordenadas que en ILWIS, por defecto, es de tipo métrico (p.e. coordenadas UTM). Para mapas ráster y tablas se puede usar también una notación en latitud/longitud, lo que no es posible para datos vectoriales.

### A.2.1. Mapas de Puntos.

Son mapas de tipo vectorial que contienen puntos que pueden hacer referencia a:

- características cualitativas distintivas de los elementos que forman el mapa, como por ej. los nombres de estaciones meteorológicas.
- clases a las que pertenecen los elementos que forman el mapa, como por ej. el tipo de estación meteorológica representada en el mapa.
- valores cuantitativos, como medidas de la profundidad de un horizonte del suelo, etc..

Los datos puntuales (como sondeos, estaciones meteorológicas, etc.) se describen utilizando:

- un par de coordenadas (x,y)
- un identificador (opcional)
- uno o más atributos (opcional)

Esta información se almacena en una tabla ASCII (con extensión .PNT) en la que al menos deben estar representadas las columnas X! e Y! (las cuales identifican las coordenadas en las que se sitúa el punto). El resto de columnas de la tabla pueden corresponderse con los identificadores o atributos.

Existe una diversidad de operaciones que se pueden realizar sobre mapas de puntos como, por ejemplo, análisis de continuidad (correlación espacial), de distribución (patrones espaciales), interpolaciones por diversos métodos (medias móviles, krigging, gridding...), etc.



Además, los puntos se utilizan también en algunos procedimientos de ILWIS, como en la georreferenciación de imágenes de satélite, la asignación de nombres a polígonos o la creación de anotaciones para las leyendas de mapas.

### **A.2.2. Mapas de Segmentos.**

Los mapas de segmentos son mapas vectoriales que se utilizan para representar elementos de tipo lineal como ríos, carreteras o isolíneas. La información que contienen puede hacer referencia a:

- rasgos lineales individuales, en los que cada segmento se identifica utilizando un código único (por ej. los códigos que identifican a cada carretera en un mapa).
- rasgos lineales de grupo, cuando identifican elementos pertenecientes a una misma clase (p.e. la categoría a la que pertenecen las carreteras).
- rasgos lineales que representan valores cuantitativos, como por ej. las curvas de nivel en un mapa topográfico.

Un segmento es una lista de coordenadas con un código de identificación. Los mapas de segmentos se componen en ILWIS de dos archivos binarios (.SEG y .CRD) y un fichero ASCII (.SLG).

En el fichero .SEG se almacenan el código, puntos inicial y final y número de puntos intermedios de que se compone cada segmento. El fichero .CRD contiene todos los puntos intermedios de cada segmento. El fichero .SLG contiene la información que establece el nexo de unión con el mapa de polígonos (si existe) creado a partir del mapa de segmentos.

Además de las operaciones típicas de creación, despliegue por pantalla y edición de los mapas de segmentos, existe otra serie de operaciones que es posible ejecutar para extraer información de los mismos, como cálculos direccionales, análisis de densidad, transformación a otros sistemas de coordenadas, extracción de códigos, etc.

### **A.2.3. Mapas de polígonos.**

Un polígono es una serie de segmentos ligados que delimitan un área. Las provincias, formaciones geológicas y otras unidades cartográficas se pueden almacenar como polígonos. Al igual que para los mapas de segmentos, los polígonos pueden hacer referencia a tres tipos de elementos:

- elementos areales individuales, como por ejemplo parcelas en un plano catastral.
- clases de elementos areales, como por ejemplo usos del suelo.
- elementos areales cuantitativos, como por ej. la conductividad hidráulica de un acuífero.

Los mapas de polígonos se construyen a partir de las coordenadas x,y de los puntos que forman los segmentos que definen los límites del área de cada uno de ellos. Para definir los polígonos es necesario, además de identificar los segmentos que marcan los límites, definir su topología (expresión de las relaciones existentes entre los elementos geográficos representados en el mapa).

Los polígonos se almacenan utilizando dos ficheros binarios de extensiones .POL y .TOP y un fichero ASCII .PLG. El fichero .POL contiene, para cada polígono, su nombre, color, segmento de inicio y número de segmentos. El fichero .TOP contiene la topología de cada polígono y las interrelaciones entre ellos. El fichero .PLG contiene la relación con el mapa de segmentos.

La mayor parte de las herramientas de análisis espacial de ILWIS se han diseñado para ejecutar operaciones sobre mapas ráster, por lo que los mapas de polígonos se utilizan principalmente como paso intermedio para la elaboración de este tipo de mapas.

#### A.2.4. Mapas Ráster.

Un mapa ráster se compone de dos archivos binarios: .MPD y .MPI. El fichero .MPD almacena de forma secuencial (línea a línea) el valor de cada píxel que compone el mapa. El fichero .MPI contiene información sobre el tamaño del mapa y, en el caso de que esté georreferenciado, sobre el sistema de coordenadas que utiliza y el tamaño del píxel (en metros).

Es posible almacenar como mapas ráster imágenes de satélite, modelos digitales de terreno, polígonos o segmentos rasterizados, etc.. En ILWIS se distinguen tres tipos de mapas ráster: bit, byte y entero, dependiendo del rango en el que estén comprendidos los valores que adoptan los píxeles.

En los mapas bit los píxeles adoptan un valor de 0 (Falso) ó 1 (Verdadero) y cada píxel se almacena utilizando 1 bit. En los byte, los valores de los píxeles se sitúan entre 0 y 255 y un píxel ocupa un byte (ocho bits). Por último, en los mapas enteros los valores de los píxeles están comprendidos entre -32767 y 32767 y cada píxel se almacena utilizando dos bytes (16 bits).

Para los mapas enteros, ILWIS permite utilizar un *factor de escala* para indicar la precisión de los valores representados en el mapa. Así, un factor de escala de 0 indica que los valores del mapa están comprendidos dentro del rango predeterminado por ILWIS, mientras un factor de 1 utiliza un rango de -327670 a 327670 y un factor de -2 representa los valores en el intervalo de -327.67 a 327.67.

Existe un rango muy amplio de operaciones que resulta posible llevar a cabo sobre los mapas ráster, desde las operaciones clásicas de tratamiento digital de imagen (realce, creación de composiciones en color, clasificación supervisada...) a operaciones de análisis espacial, cálculo de distancias, etc.

### **A.2.5. Datos alfanuméricos.**

Los datos de tipo alfanumérico o atributos asociados a los datos espaciales se representan en ILWIS haciendo uso de tablas.

Las tablas en ILWIS se almacenan en ficheros ASCII con una cabecera que indica el nombre de cada columna y una línea para cada registro de la tabla. Los atributos de polígonos, puntos, tablas de color, histogramas, etc. se almacenan de esta forma. La extensión de una tabla por defecto es .TBL.

### **A.3. Operaciones disponibles en la versión 1.41.**

A continuación se presenta una descripción de las operaciones más significativas que es posible ejecutar en la versión 1.41 de ILWIS, que ha sido la utilizada para el desarrollo de este estudio.

#### **A.3.1. Operaciones de intercambio de datos digitales (entrada/salida).**

Permite al usuario intercambiar información geográfica (en modo vectorial o ráster) y datos de tipo atributo con sistemas que utilizan formatos de almacenamiento diferentes al de ILWIS.

Los formatos de ficheros vectoriales entre los que es posible intercambiar datos son, entre otros, Intergraph-SIF, AutoCAD-DXF, Arc/Info, HPGL y Erdas-DIG. En cuanto a los formatos ráster, ILWIS incluye conversiones de/hacia TIFF, Erdas-LAN, Erdas-GIS, Windows bitmap, LIP-file, GIF, PCX, Arc/Info-NAS, ASCII y otros. Por último, también es posible convertir datos de tipo tabular de/hacia formatos dBase-DBF, Delimited, Lotus-DIF y dBase-SDF.

#### **A.3.2. Operaciones con mapas vectoriales.**

El módulo de manejo de datos vectoriales presenta una serie de opciones comunes que permiten al usuario crear, visualizar por pantalla, editar (cambio de códigos, color...), actualizar y rasterizar cualquiera de los tipos de mapas vectoriales (puntos, segmentos y polígonos). También existe la opción de transformación de cualquiera de estos mapas a modo ráster. Además de este tipo de operaciones comunes, ILWIS proporciona algunas específicas para cada tipo de mapa, de las que más destacadas son las siguientes:

##### **A) Mapas de puntos.**

Las operaciones principales que se pueden ejecutar sobre mapas de puntos son las siguientes:

- Análisis de patrones espaciales.
- Análisis de correlación espacial.
- Conversión de una proyección y sistema de coordenadas a otros.

#### B) Mapas de segmentos.

Las operaciones principales que se pueden ejecutar sobre mapas de segmentos son las siguientes:

- Análisis del orden de ríos.
- Cálculo de la densidad de segmentos (en metros x m<sup>2</sup>) y del número de segmentos por unidad de superficie.
- Copia selectiva de códigos de mapas a un nuevo archivo, unión de dos o más mapas vectoriales y eliminación de información redundante.
- Edición automática de segmentos duplicados.
- Conversión de segmentos de una proyección y sistema de coordenadas a otros.
- Transformación de coordenadas de mapas por traslación, rotación o combinación de ambas.
- Creación de mapas de polígonos a partir de mapas de segmentos.

#### C) Mapas de polígonos

Como ya hemos visto previamente, los mapas de polígonos se utilizan principalmente como paso intermedio para el tratamiento de información analógica en formato ráster. Por ello, el tipo de operaciones que se pueden ejecutar sobre éstos son principalmente de edición y extracción de información (identificación de límites de polígonos, de polígonos adyacentes, etc.).

#### A.3.3. Operaciones con mapas ráster.

El módulo de manejo de mapas ráster permite al usuario procesar, analizar y visualizar la información geográfica almacenada en formato ráster (mapas digitalizados y rasterizados y datos de satélite). El módulo ráster también permite al usuario georreferenciar ficheros ráster y ligarlos con datos relativos a atributos que están almacenados en la base de datos interna de ILWIS. Además de las operaciones de edición de sus propiedades, visualización, asignación de paletas de color y otras comunes a otros sistemas, las principales herramientas de tratamiento de información que incorpora son las siguientes:

- Recuperación de la información de píxeles individuales de uno o más mapas ráster y de polígonos y tablas ligados a estos mapas.
- Despliegue de mapas en perspectiva 3D con el apoyo de modelos de elevación digital.

- Creación de pares estereoscópicos.
- Ejecución de análisis espaciales sobre varios mapas ráster para superposición de mapas y algunas otras funciones de análisis espacial.
- Cruce de mapas ráster.
- Paso de diversos tipo de filtros para extraer información o mejorar espacialmente la calidad de los mapas.
- Cálculo de distancias y creación de mapas de Thiessen para objetos definidos por el usuario, con la posibilidad de tener en cuenta factores de resistividad.
- Interpolación entre puntos o isolíneas.
- Remuestreo de mapas.
- Georreferenciación y unión de mapas.
- Capacidades estándar de tratamiento de imagen de satélite (realce, clasificación...).

#### **A.3.4. Operaciones con tablas.**

Este módulo se utiliza para el manejo de datos de atributos, e.d. la información no espacial utilizada en un Sistema de Información Geográfica. El módulo permite al usuario crear filtros y ejecutar operaciones estándar de bases de datos.

#### **A.3.5. Operaciones de salida de datos.**

El módulo de salida de datos proporciona la posibilidad de plotear o imprimir mapas, gráficos y tablas. Es posible crear leyendas u otro tipo de anotaciones sobre mapas, tramados para la impresión de mapas en blanco y negro.

## **Anexo B. Bases de Datos de Atributos**

## B. BASES DE DATOS DE ATRIBUTOS

Tabla B1. Características de los eventos eruptivos de las series III y IV.

Nombre	Centros	Clasif. Petrológica	Historia evolutiva	Material
<b>Serie IV</b>				
Chinyero	2	Basaltos Px-Plag	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Chahorra	2	Basaltos Plag-Anf	Monogenético-T-PV	dpa < col
Garachico	1	Basaltos Px-Ol + traquib. Px	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Arafo	2	Basaltos Px-Ol	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Fasnia	7	Basaltos Px-Ol	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Siete Fuentes	3	Basaltos Px-Ol	Monogenético-Dorsal	dpa ~ col
Mña. Grande	2	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Media Montaña	2	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Taoro	3	Basaltos Plag-Anf	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Cono 3 Teide	1	Traquitas	Poligenético-T-PV	dpa < col
Fisura de los Infantes	10	Basaltos	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Mña. de Las Arenas	1	Basaltos + traquib.	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Mña. Reventada	3	Traquitas máficas	Monogenético-T-PV	dpa < col
Mña. Corrales	3	Traquibasaltos	Monogenético-T-PV	dpa < col
El Portillo	3	Traquibasaltos	Monogenético-T-PV	dpa < col
E. Mña Reventada	4	Traquitas	Monogenético-T-PV	coladas
Pico Cabras	1	Traquitas	Monogenético-T-PV	coladas
Mña. Abejera	3	Traquitas	Monogenético-T-PV	dpa < col
Mña. de las Lajas	6	Traquitas	Monogenético-T-PV	dpa < col
Roques Blancos	2	Traquitas Bi-Px	Monogenético-T-PV	dpa < col
Mancha Ruana - Los Gemelos	4	Traquitas Bi-Px	Monogenético-T-PV	dpa < col
Mña. Blanca-Mña. Rajada	10	Traquitas	Monogenético-T-PV	dpa < col
SW Fortaleza ¿Arenas Blancas?	2	Traquibasaltos	Monogenético-T-PV	coladas
El Sanatorio-Mña. de la Cruz	1	Traquitas	Monogenético-T-PV	dpa < col
Mña. Majúa	3	Traquitas	Monogenético-T-PV	dpa < col
Mña. Mostaza	1	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-T-PV	dpa < col
Arenas Negras-Mña. Colorada	9	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-T-PV	dpa < col
Conos ladera S. Pico Viejo	2	Traquibasaltos	Monogenético-T-PV	dpa < col

Nombre	Centros	Clasif. Petrológica	Historia evolutiva	Material
Grupo Chío (+escorias P.V)	31	Basaltos Au-Ol + traquib.	Mon. Dorsal + T-PV	dpa < col
Lavas fase 2 Pico Viejo	3	Traquitas-fonolitas máficas	Poligenético-T-PV	coladas
Grupo Liferfe	8	Traquibasaltos	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Mña. Negra-Los Tomillos	4	Basaltos + traquib.	Monogenético-T-PV	dpa < col
Conos 1 y 2 Teide	1	Traquitas + traquib.	Poligenético-T-PV	dpa < col
Lavas fase 1 Pico Viejo	2	Traquibasaltos + Plag	Poligenético-T-PV	dpa < col
Volcán de Teno	1	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-Dorsal	dpa ~ col
Grupo S. Lorenzo	12	Basaltos Ol-Aug + Plag.	Monogenético-Dorsal	dpa < col

## Serie III

La Cabezada	1	Traquibasaltos	Monogenético-T-PV	dpa < col
Grupo Orotava	145	Basaltos Ol-Aug + traquib.	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Volcán de Taco	1	Fonolitas máficas a tefritas	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Grupo Santiago del Teide	36	Basaltos Aug-Ol + traquib.	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Mñas. Vallado y Sahorra	2	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Cerrillal W	4	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-T-PV	dpa < col
Mña. Guamasa-Mña. Roja	2	Basaltos Ol-Aug	Monogenético-T-PV	dpa < col
Traquib. y fonolitas máficas	5	Idem.	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Grupo Ucanca	103	Basaltos + traquibasaltos	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Mña. Amarilla o Pelada	1	Basaltos Plag	Monogenético-Dorsal	dpa
Mña. Guaza	2	Traquitas	Monogenético-Dorsal	dpa < col
Caldera del Rey	2	Traquitas-fonolitas	Monogenético-Dorsal	dpa

## Observaciones:

- (1) En la columna historia evolutiva se ha incluido también el grado de relación que presentan los depósitos de cada evento representado con el complejo Teide-Pico Viejo (T-PV).
- (2) *dpa* es equivalente de depósitos de proyección aérea, sin hacer alusión directa al fenómeno del que proceden, mientras que *col* equivale a coladas.
- (4) la relación *dpa* < *col* indica que la cantidad de materiales lávicos ha sido superior (en ocasiones en proporciones muy importantes) que la emisión de materiales de proyección aérea, mientras que la relación *dpa* ~ *col* indica que no existe una gran diferencia entre ambos tipos de depósito. Ambas relaciones han sido establecidas teniendo en cuenta los depósitos que actualmente se observan, por lo que puede haber casos en que la asignación tenga un margen de error elevado.



**Tabla B2.** Resultados del análisis del número de vecinos reflexivos para una distribución de puntos regular.

Orden	Valor observado	Valor esperado en situación de aleatoriedad absoluta
1	288	209.45
2	138	110.91
3	122	81.92
4	136	67.91
5	118	59.31
6	104	53.31

**Tabla B3.** Resultados del análisis de la distancia media al vecino más próximo para una distribución de puntos regular.

Orden	Valor observado	Valor esperado en situación de aleatoriedad absoluta
1	4171.17	2072.75
2	4433.80	3109.13
3	4466.33	3886.41
4	4727.86	4533.94
5	6168.73	5105.04
6	6589.22	5610.94

**Tabla B4.** Resultados del análisis del número de vecinos reflexivos para una distribución de puntos aleatoria.

Orden	Valor observado	Valor esperado en situación de aleatoriedad absoluta
1	288	285.27
2	156	151.06
3	112	111.58
4	96	92.49
5	84	80.78
6	72	72.61

Tabla B5. Resultados del análisis de la distancia media al vecino más próximo para una distribución de puntos aleatoria.

Orden	Valor observado	Valor esperado en situación de aleatoriedad absoluta
1	931.09	926.98
2	1447.99	1390.48
3	1840.68	1738.10
4	2172.55	2027.69
5	2452.93	2281.31
6	2687.02	2509.35

Tabla B6. Estadísticas de población de los núcleos urbanos de Tenerife.

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m²)
13566	ALMACIGA	140	3,29	7500
13567	AZANOS	0	0,00	15000
13568	BANQUITOS (LOS)	0	0,00	17500
13569	BARRANCO GRANDE	1484	3,87	37500
13570	BARRIADA GRAL GARCIA	441	3,49	30000
13571	BARRIO BUENOS AIRES	113	3,49	20000
13572	BARRIO DE CHAMBERI	169	3,49	12500
13573	BARRIO DE LA ALEGRÍA	1695	3,49	160000
13574	BENIJO	0	0,00	15000
13575	BUFADERO	0	0,00	72500
13576	CAMPITOS (LOS)	302	3,82	10000
13577	CASAS DE ABAJO	0	0,00	12500
13578	CASAS DE AFUR (LAS)	70	3,36	47500
13579	CASAS DE LA CUMBRE	61	4,26	125000
13580	CATALANES	0	0,00	5000
13581	CUEVA BERMEJA	128	3,66	32500
13582	CUMBRILLA (LA)	25	2,08	47500
13583	CHAMORGA	32	3,36	37500
13584	DELICIAS (LAS)	0	0,00	7500
13585	DRAGUILLO (EL)	19	2,00	50000

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m²)
13586	HOYA FRIA	0	0,00	12500
13587	IGUESTE DE S. ANDRES	377	3,84	20000
13588	LOMITO DEL LLANO	0	0,00	20000
13589	LOMO BERMEJO	0	0,00	77500
13590	LOMO DE LA CRUZ	0	0,00	32500
13591	LOMO DE LAS BODEGAS	68	2,56	65000
13592	MARIA JIMENEZ	459	3,75	32500
13593	NARANJOS (LOS)	0	0,00	25000
13594	PALMAS (LAS)	0	0,00	27500
13595	ROQUE DE LAS BODEGAS	0	0,00	175000
13596	ROQUE NEGRO	92	3,22	187500
13597	SAN ANDRES	982	3,75	57500
13598	JUAN	0	0,00	5000
13599	STA CRUZ DE TENERIFE	54084	3,49	4822500
13600	SANTA MARIA DEL MAR	455	3,89	12500
13601	SOBRADILLO (EL)	778	4,00	242500
13602	TABLERO (EL)	493	4,06	147500
13603	TABORNO	60	3,08	77500
13604	TAGANANA	426	3,20	115000
13605	VALLE BROSQUE	0	0,00	55000
13606	VALLE CRISPIN	0	0,00	37500
13607	VALLE GRANDE	0	0,00	10000
13608	VALLE SECO	827	3,67	50000
13609	ADEJE	1485	3,64	245000
13610	ARMEÑIME	465	4,15	47500
13611	CALDERA (LA)	36	3,67	70000
13612	CALETA (LA)	398	3,56	130000
13613	FAÑABE	246	4,01	67500
13614	IFONCHE	19	3,88	127500
13615	MENORES (LOS)	0	0,00	92500
13616	PUERTITO (EL)	20	4,31	87500
13617	RICASA	48	5,00	72500
13618	TAUCHO	108	2,97	170000
13619	TIJOCO ALTO	0	0,00	85000
13620	TIJOCO BAJO	346	4,26	320000
13634	ARAFO	1241	3,55	1047500

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m <sup>2</sup> )
13635	MEDIO CAMINO	0	0,00	5000
13636	HIDALGA (LA)	159	3,42	95000
13637	ARICO EL NUEVO	70	3,50	75000
13638	ARICO/LOMO DE ARICO	305	3,33	512500
13639	ARICO VIEJO	383	3,39	60000
13640	BUENO (EL)	0	0,00	30000
13641	CISNERA (LA)	203	3,88	127500
13642	COLMENEROS (LOS)	0	0,00	62500
13643	CHAJAÑA	0	0,00	137500
13644	DEGOLLADA (LA)	0	0,00	25000
13645	FLORIDA (LA)	0	0,00	80000
13646	FUENTE NUEVA (LA)	0	0,00	60000
13647	GAVILANES (LOS)	70	3,33	7500
13648	ICOR	179	3,22	27500
13649	LOMO OLIVA	0	0,00	7500
13650	MADRE DEL AGUA	0	0,00	75000
13651	PORIS DE ABONA	1867	2,71	90000
13652	RIO (EL)	256	4,22	42500
13653	SABINITA (LA)	0	0,00	162500
13654	SAN MIGUEL DE TAJAO	132	2,77	47500
13655	ARONA	537	3,82	670000
13656	BUZANADA	448	3,75	187500
13657	CABO BLANCO	841	4,12	242500
13658	CAMELLA (LA)	422	3,81	55000
13659	CRISTIANOS (LOS)	8361	3,05	137500
13660	CHAYOFA	304	2,58	37500
13661	CHO	0	0,00	95000
13662	GALLETAS (LAS)	2286	3,44	35000
13663	SABINITA (LA)	0	0,00	75000
13664	COSTA DEL SILENCIO	2129	2,91	82500
13665	URB. LA FLORIDA	0	0,00	92500
13666	URB. PALMMAR	228	2,22	47500
13667	U.P.DE LAS AMERICAS	3836	2,87	85000
13668	VALLE DE S. LORENZO	1032	3,81	282500
13695	BUENAVISTA DEL NORTE	1149	4,05	675000
13696	CANTERAS (LAS)	43	3,97	47500

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m²)
13697	CARRIZALES (LOS)	31	2,65	90000
13698	MASCA	70	3,04	212500
13699	PALMAR (EL)	187	4,05	175000
13700	PORTELAS (LAS)	117	4,27	105000
13701	TENO	58	3,26	120000
13702	ARAYA	375	3,58	285000
13703	BARRANCO HONDO	638	3,44	172500
13704	CALETILLAS (LAS)	1093	2,96	20000
13705	CANDELARIA	3065	3,27	355000
13706	CUEVECITAS (LAS)	213	3,58	95000
13707	IGUESTE	563	3,44	227500
13708	MALPAIS	120	3,57	152500
13709	CRUZ DEL ROQUE	44	3,18	5000
13710	FASNIA	619	3,10	987500
13711	SABINA ALTA	62	3,03	220000
13712	SOMBRERA (LA)	58	3,55	267500
13713	ZARZA (LA)	201	3,10	52500
13728	CALETA DE INTERIAN	176	3,80	30000
13729	CRUCES (LAS)	126	4,16	-1,000e+38
13730	GARACHICO	729	4,16	402500
13731	GENOVES	211	4,34	7500
13732	GUINCHO (EL)	109	3,96	22500
13733	MONTAÑETA (LA)	70	3,71	220000
13734	SAN JUAN DEL REPARO	221	4,40	72500
13735	SAN PEDRO DE DAUTE	55	4,34	17500
13748	ABRIGO (LOS)	596	3,46	10000
13749	ARENAS DEL MAR	0	0,00	12500
13750	ATOGO	0	0,00	17500
13751	BLANQUITOS (LOS)	142	3,68	17500
13752	CANTERA (LA)	0	0,00	30000
13753	CASTRO	0	0,00	37500
13754	CRUZ DE TEA	98	4,03	65000
13755	CUERVOS (LOS)	0	0,00	37500
13756	CHARCO DEL PINO	763	3,81	570000
13757	CHIMICHE	355	3,36	200000
13758	DESIERTO (EL)	100	3,33	20000

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m <sup>2</sup> )
13759	DRAGUITO (EL)	0	0,00	347500
13760	GRANADILLA DE ABONA	1528	3,79	1117500
13761	HIGUERA (LA)	0	0,00	67500
13762	MARETA (LA)	0	0,00	10000
13763	MEDANO (EL)	2167	3,13	50000
13764	PALOMAS (LAS)	0	0,00	30000
13765	SALTO (EL)	284	3,31	60000
13766	SAN ISIDRO	1908	3,74	70000
13767	SOBRE LA FUENTE	0	0,00	7500
13768	VEGAS (LAS)	0	0,00	55000
13769	VELAZQUEZ	0	0,00	7500
13770	VICACARO	0	0,00	17500
13771	COSTA (LA)	0	0,00	5000
13772	GUANCHA (LA)	924	3,92	405000
13773	LLANO DE MENDEZ	12	4,09	10000
13774	SANTA CATALINA	173	3,94	42500
13775	TIERRA DE COSTA	19	4,60	15000
13776	ABAMA	0	0,00	52500
13777	ACOTEJA	0	0,00	50000
13778	ALCALA	1503	3,81	112500
13779	ARIPE	0	0,00	175000
13780	CHIGUERGUE	0	0,00	45000
13781	CHIO	656	3,71	235000
13782	CHIRCHE	0	0,00	140000
13783	FUENTES (LAS)	0	0,00	32500
13784	GUIA DE ISORA	1777	3,90	862500
13785	JARAL (EL)	0	0,00	65000
13786	PLAYA DE SAN JUAN	1223	3,85	125000
13787	TEJINA	0	0,00	305000
13788	VERA DE ERQUE	0	0,00	120000
13789	AGUERCHE	0	0,00	5000
13790	ESCOBONAL (EL)	654	2,57	357500
13791	GÜIMAR	3684	3,65	1357500
13792	LOMO DE MENA	152	2,97	230000
13793	MEDIDA (LA)	145	3,22	52500
13794	PAJARA	57	3,34	255000

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m <sup>2</sup> )
13795	PUERTO DE GÜIMAR	1282	3,28	115000
13796	SOCORRO (EL)	253	3,11	32500
13797	TABLADO (EL)	198	2,41	12500
13817	AMPARO (EL)	387	3,93	60000
13818	BUEN PASO	640	4,10	70000
13819	CAÑAS (LAS)	214	3,83	12500
13820	CUEVA DEL VIENTO	1050	4,03	155000
13821	ICOD DE LOS VINOS	2412	3,80	925000
13822	MANCHA (LA)	773	4,08	110000
13823	SAN FELIPE	502	3,90	37500
13824	SANTA BARBARA	727	4,08	10000
13825	VEGA (LA)	308	4,70	282500
13826	BAJAMAR	1787	2,90	170000
13827	BALDIOS (LOS)	596	3,83	7500
13828	BATAN DE ABAJO	0	0,00	22500
13829	BATAN DE ARRIBA	0	0,00	10000
13830	CARBONERAS (LAS)	0	0,00	75000
13831	CUESTA (LA)	7280	3,49	32500
13832	CHINAMADA	0	0,00	10000
13833	GUAMASA	1055	0,00	130000
13834	HIGUERITA (LA)	0	0,00	430000
13835	MERCEDES (LAS)	198	3,27	127500
13836	ORTIGAL (EL)	414	3,76	32500
13837	PUNTA DEL HIDALGO	1013	3,53	177500
13838	S.BARTOLOME GENETO	761	3,86	2500
13839	S.CRISTOBAL DE LA LAGUNA	10439	3,64	3167500
13840	SAN DIEGO	0	0,00	5000
13841	SAN MIGUEL DE GENETO	0	0,00	17500
13842	SOLIS	0	0,00	22500
13843	TACO	7023	3,71	120000
13844	TEJINA	1814	3,94	380000
13845	VALLE DE GUERRA	1583	3,81	132500
13846	VALLES (LOS)	738	3,66	5000
13859	MATANZA DE ACENTEJO	1561	4,19	647500
13875	AGUAMANSA	367	4,12	22500
13877	BEBEDERO (EL)	263	4,38	7500

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m²)
13878	BENIJOS	362	4,27	50000
13879	CAMINO DE CHASNA EL	253	4,25	10000
13880	CANDIA (LA)	160	4,07	10000
13881	CAÑADAS DEL TEIDE	10	1,00	30000
13882	DEHESA ALTA (LA)	222	4,12	40000
13883	DEHESA BAJA (LA)	36	3,75	37500
13884	DURAZNO (EL)	99	3,64	7500
13885	FLORIDA (LA)	398	4,33	10000
13886	FRONTONES (LOS)	200	4,06	35000
13887	GOMEZ (LOS)	191	4,01	25000
13888	HACIENDA PERDIDA	358	4,30	30000
13889	LUZ (LA)	234	4,07	30000
13890	MARZAGA (LA)	132	3,67	27500
13891	MONTIJOS	75	3,90	5000
13892	OROTAVA (LA)	5013	3,75	1175000
13893	PERDOMA (LA)	1118	4,12	262500
13894	PINO ALTO	83	3,53	2500
13895	PINOLERIS	162	4,59	25000
13896	RECHAZOS (LOS)	89	3,35	25000
13897	RINCON (EL)	88	3,62	245000
13898	SAN ANTONIO	581	4,63	22500
13899	SAN JERONIMO	5	3,50	5000
13900	SAN MIGUEL	194	3,40	5000
13901	SAUCE (EL)	125	4,40	10000
13909	ARENAS (LAS)	281	3,82	7500
13910	LAS DEHESAS	0	0,00	15000
13911	DURAZNO (EL)	0	0,00	7500
13912	PUERTO DE LA CRUZ	11760	3,37	1317500
13913	PUNTA BRAVA	309	3,37	32500
13914	VERA (LA)	941	3,37	107500
13924	AZADILLA (LA)	68	3,37	5000
13925	BREZAL	65	3,37	10000
13926	CARRERA (LA)	272	3,37	32500
13927	CRUZ SANTA	824	4,06	415000
13928	HOYA DE FARRAIS	0	0,00	15000
13929	HOYA DE PABLO	0	0,00	15000



Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m <sup>2</sup> )
13930	ICOD EL ALTO	962	4,21	120000
13931	LONGUERA (LA)	1630	3,13	7500
13932	LLANADAS (LAS)	176	4,20	20000
13933	MONTAÑETA (LA)	930	4,00	15000
13934	PALO BLANCO	560	4,20	40000
13935	PLACERES (LOS)	0	0,00	30000
13936	PUERTO DE LA RAMBLA	0	0,00	10000
13937	QUINTOS (LOS)	0	0,00	30000
13938	RAMBLA (LA)	0	0,00	5000
13939	REALEJO ALTO	4139	3,74	260000
13940	REALEJO BAJO	152	3,74	7500
13941	SAN AGUSTIN	0	0,00	57500
13942	SAN BENITO	0	0,00	37500
13943	SAN VICENTE	0	0,00	22500
13944	TIGAIGA	0	0,00	22500
13945	TOSCAL (EL)	746	3,13	2500
13946	VIÑATICO (EL)	0	0,00	50000
13947	ZAMORA ALTA	103	4,00	-1,000e+38
13948	ZAMORA BAJA	161	4,00	-1,000e+38
13949	ESPERANZA (LA)	872	3,67	1485000
13950	LOMO PELADO	95	3,89	55000
13951	LLANO DEL MORO	176	3,93	42500
13952	ROSAS (LAS)	287	3,54	342500
13953	SAN ISIDRO	113	3,68	167500
13954	TABAIBA	127	2,83	7500
13974	AGUAS (LAS)	161	3,85	47500
13975	CANARIOS (LOS)	0	0,00	17500
13976	FUENTE DEL BARDO	0	0,00	40000
13977	MEDIANAS DE LA VERA	0	0,00	27500
13978	PORTALINA (LA)	0	0,00	17500
13979	QUEVEDOS (LOS)	0	0,00	7500
13980	RAMBLA (LA)	0	0,00	20000
13981	ROSAS (LAS)	188	4,36	2500
13982	SAN JOSE	365	4,38	5000
13983	S JUAN DE LA RAMBLA	306	3,62	132500
13984	VERA (LA)	313	4,55	10000

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m <sup>2</sup> )
13985	ALDEA BLANCA	118	3,96	225000
13986	FRONTON (EL)	67	4,09	5000
13987	GUINCHO (EL)	0	0,00	2500
13988	ROQUE (EL)	196	4,05	17500
13989	SAN MIGUEL	553	4,07	527500
13990	TAMAIDE	285	3,80	50000
13991	ZOCAS (LAS)	223	4,24	185000
14024	CANTILLO (EL)	47	3,50	10000
14025	CORUJERA (LA)	702	3,66	55000
14026	CUESTA DE LA VILLA	651	3,40	17500
14027	FARROBILLO	256	3,52	65000
14028	SANTA URSULA	770	3,34	225000
14029	TOSCA DE ANA MARIA	158	3,49	80000
14030	VERA (LA)	376	3,66	75000
14031	URB.ACANT. GIGANTES	1798	2,30	15000
14032	ARGUAYO	187	3,60	152500
14033	CASCAJO (EL)	0	0,00	12500
14034	MALPAIS	0	0,00	10000
14035	MANCHAS (LAS)	57	3,84	50000
14036	MOLLEDO (EL)	26	4,57	27500
14037	PUERTO DE SANTIAGO	2223	3,01	12500
14038	RETAMAR (EL)	21	3,60	50000
14039	SANTIAGO DEL TEIDE	133	3,34	235000
14040	TAMAIMO	521	3,78	27500
14041	VALLE DE ARRIBA	42	4,30	60000
14042	RAVELO	1007	4,05	72500
14043	SAUZAL	1067	3,46	307500
14044	CALETA (LA)	244	4,09	37500
14045	COSTA (LA)	0	0,00	15000
14046	CUEVAS NEGRAS (LAS)	0	0,00	20000
14047	DAUTE	0	0,00	10000
14048	ERJOS	50	3,23	72500
14049	JUNCIA (LA)	0	0,00	22500
14050	LOMO MORIN (EL)	0	0,00	10000
14051	SAN BERNARDO	314	4,17	32500
14052	SAN JOSE	558	3,33	65000

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m²)
14053	SILOS (LOS)(CASCO)	504	3,76	577500
14054	TIERRA DEL TRIGO	119	3,34	62500
14055	ADELANTADO	225	4,01	115000
14056	AGUA GARCIA	811	4,06	112500
14057	BCO. DE LAS LAJAS	462	3,94	310000
14058	CAMPO DE GOLF	149	3,69	17500
14059	CARIDAD (LA)	455	3,77	35000
14060	CASAS ALTAS (LAS)	196	4,18	15000
14061	CIUDAD DEL WAQUE	0	0,00	162500
14062	CUESTA (LA)	0	0,00	12500
14063	GUAYONJE	266	3,87	52500
14064	HUERTA VICHO	0	0,00	72500
14065	JUAN FERNANDEZ	58	3,61	67500
14066	LOMO COLORADO	334	3,73	47500
14067	MESA DEL MAR	607	2,82	25000
14068	MONTAÑETA (LA)	0	0,00	22500
14069	NARANJEROS (LOS)	219	3,51	397500
14070	PRIS (EL)	193	2,90	15000
14071	PUERTO DE LA MADERA	68	3,31	97500
14072	S.JERONIMO PERALES	204	3,51	192500
14073	TACORONTE	1606	3,65	882500
14074	CRUZ GRANDE	0	0,00	102500
14075	ERJOS DEL TANQUE	63	3,88	7500
14076	LLANOS (LOS)	171	4,23	125000
14077	RUIGOMEZ	136	4,40	102500
14078	TANQUE (EL)	583	4,16	17500
14086	CANTERAS (LAS)	141	3,66	25000
14087	GOMERO (EL)	0	0,00	15000
14088	INFIERNO (EL)	0	0,00	22500
14089	LOMO PEDRO ALVAREZ	0	0,00	42500
14090	MOLINA	0	0,00	15000
14092	PADILLA (LA)	0	0,00	72500
14093	PALOMAR (EL)	0	0,00	20000
14094	PEDRO ALVAREZ	418	3,57	130000
14095	PORTEZUELO (EL)	444	3,67	7500
14096	SAN GONZALO	0	0,00	2500

Código	Nombre	Nº Viviendas	Ocupantes	Superficie (m²)
14097	SAN LUIS	0	0,00	12500
14098	SOCORRO (EL)	271	3,91	7500
14099	TEGUESTE	1253	3,65	255000
14181	ALTOS Y ARROYOS	425	3,98	20000
14182	BAJOS Y TAGORO	840	3,66	77500
14184	CRUZ DE PERERA (LA)	0	0,00	15000
14185	FUENTE DEL TANQUE	0	0,00	10000
14186	RESBALA (LA)	276	3,84	5000
14187	VERA-CARRIL (LA)	269	4,18	85000
14188	VICTORIA DE ACENTEJO	649	3,55	437500
14189	ESCALONA	256	3,30	442500
14190	JAMA	78	3,17	97500
14191	TREVEJOS	58	3,40	40000
14192	VILAFLORE	402	3,32	720000
14193	RAMONAL	0	0,00	5000
14194	CHAPATAL-VISTA BELLA	0	0,00	30000

Tabla B7. Redes de comunicación viaria de Tenerife.

Código	Identificación	Código	Identificación	Código	Identificación
31100	TF 1	33142	TF 142	33621	TF 621
31500	TF 5	33211	TF 211	33622	TF 622
32820	C 820	33212	TF 212	33623	TF 623
32821	C 821	33213	TF 213	341111	TF 1111
32822	C 822	33214	TF 214	341113	TF 1113
32823	C 823	33221	TF 221	341121	TF 1121
32824	C 824	33222	TF 222	341122	TF 1122
33111	TF 111	33411	TF 411	341123	TF 1123
33112	TF 112	33412	TF 412	341134	TF 1134
33114	TF 114	33413	TF 413	341138	TF 1138
33121	TF 121	33414	TF 414	341141	TF 1141
33122	TF 122	33511	TF 511	341143	TF 1143
33123	TF 123	33611	TF 611	341145	TF 1145
33131	TF 131	33612	TF 612	341213	TF 1213
33132	TF 132	33613	TF 613	341214	TF 1214

Código	Identificación	Código	Identificación	Código	Identificación
33141	TF 141	33614	TF 614	341221	TF 1221
341222	TF 1222	343118	TF 3118	346119	TF 6119
341223	TF 1223	344112	TF 4112	346121	TF 6121
341224	TF 1224	344113	TF 4113	346131	TF 6131
341324	TF 1324	344115	TF 4115	346133	TF 6133
341421	TF 1421	344119	TF 4119	346141	TF 6141
341423	TF 1423	344122	TF 4122	346142	TF 6142
341426	TF 1426	344131	TF 4131	346148	TF 6148
341427	TF 1427	344132	TF 4132	346212	TF 6212
341481	TF 1481	344133	TF 4133	346213	TF 6213
342111	TF 2111	344142	TF 4142	346214	TF 6214
342115	TF 2115	344144	TF 4144	346221	TF 6221
342214	TF 2214	344147	TF 4147	346222	TF 6222
342216	TF 2216	345111	TF 5111	346225	TF 6225
342223	TF 2223	345112	TF 5112	346226	TF 6226
342224	TF 2224	345113	TF 5113	346231	TF 6231
342226	TF 2226	345114	TF 5114	346232	TF 6232
342228	TF 2228	345121	TF 5121	346233	TF 6233
342232	TF 2232	345123	TF 5123	346237	TF 6237
343115	TF 3115	345125	TF 5125	35000	PISTA
343117	TF 3117	346115	TF 6115	36000	SN

Tabla B8. Elementos estratégicos de Tenerife.

**Hospitales**

Arona (2):	226 camas
Garachico (1):	60
Icod (1):	26
La Laguna (2):	694
La Orotaba (1):	112
Pto. de la Cruz (3):	305
Sta. Cruz de Tenerife (11):	2668

**Centros de Salud (sin camas)**

La Guancha
Candelaria
Guía de Isora
Güimar
Los Realejos
Los Silos
Tacoronte
Tejina

## Establecimientos colectivos

Adeje (3)	Armeñime (1)	Caleta (La) (1)	<i>Callao Salvaje</i> (9)
<i>Marazul</i> (1)	Playa de Las Américas (105)	Puertito (El) (1)	Ricasa (4)
Arafo (4)	Arico el Nuevo (1)	Villa de Arico (6)	Arico el Viejo (1)
Cisnera (La) (5)	Gavilanes (Los) (3)	Icor (24)	Poris de Abona (5)
S. Miguel Tajao (1)	Arona (2)	Camella (La) (2)	Cristianos (Los) (39)
Galletas (Las) (2)	Costa del Silencio (7)	Buenavista (2)	Caletillas (Las) (3)
Candelaria (5)	Iguete (1)	Fasnia (1)	Sabina Alta (3)
Sombrera (La) (1)	Garachico (2)	S. Juan del Reparo (2)	Montañeta (La) (1)
Abrigos (Los) (2)	Blanquitos (Los) (5)	Chimiche (3)	Desierto (El) (2)
Granadilla (5)	Médano (El) (14)	Salto (El) (5)	Alcalá (1)
Guía de Isora (2)	Playa de S. Juan (1)	Barrancos (Los) (1)	Escobonal (El) (1)
Güimar (9)	Lomo de Mena (2)	Medida (La) (3)	Pájara (1)
Puertito Güimar (1)	Socorro (El) (3)	Buen Paso (1)	Icod de los Vinos (3)
<i>Bajamar</i> (6)	<i>Cuesta</i> (La) (14)	<i>Finca España</i> (3)	<i>Geneto</i> (9)
<i>Gracia</i> (3)	Guamasa (1)	<i>Jardina</i> (2)	Mercedes (Las) (6)
<i>Montañas (Las)</i> (13)	Ortigal (El) (2)	Pta. del Hidalgo (3)	<i>Rodeos (Los)</i> (2)
Laguna (La) (30)	<i>S. Lázaro</i> (3)	Taco (5)	Tejina (2)
Valle Guerra (7)	Valles (Los) (4)	<i>Vega Lagunera</i> (2)	<i>Vega las Mercedes</i> (5)
Benijos (1)	Cañadas del Teide (Las) (2)	Dehesa Alta (1)	Durazno (El) (1)
Orotava (La) (7)	S. Miguel (1)	Pto. de la Cruz (121)	Icod el Alto (1)
Longuera-Toscal (3)	Montaña-Zamora (2)	Realejos (1)	Esperanza (La) (6)
<i>Radazul</i> (3)	S. Isidro (1)	<i>Tabaiba</i> (2)	Bco. Grande (3)
Campitos (Los) (6)	Cueva Bermeja (2)	<i>Llano del Moro</i> (1)	S. Andrés (8)
Sta. Cruz (198)	Sobradillo (El) (2)	Tablero (El) (2)	<i>Tincer</i> (2)
Valleseco (2)	<i>Alisios</i> (2)	<i>Valle Tahodio</i> (1)	Cantillo (El) (1)
Vera (La) (10)	<i>Quinta (La)</i> (1)	Pto. de Santiago (11)	Acant. Gigantes (2)
Ravelo (1)	Sauzal (El) (1)	Casco (El) (1)	Bco. las Lajas (1)
Mesa del Mar (1)	Tacoronte (1)	<i>Tagoro</i> (1)	Pedro Álvarez (1)
Tegueste (2)	Vilaflor (3)		

\* Las poblaciones en cursiva son aquellas que no tienen correspondiente en la información cartográfica de que disponemos.

## Repetidores/Emisoras (coordenadas de localización: xUTM , yUTM)

375950 , 3151275      364300 , 3148500      352800 , 3132100

## Puertos

Los Cristianos

Puerto de Güimar

Pto. de Abona

Sta. Cruz de Tenerife

**Aeropuertos**

Aeropuerto de Los Rodeos

Aeropuerto Reina Sofía

**Estaciones de Servicio (coordenadas de localización: xUTM , yUTM)**

357750 , 3100150	331600 , 3104100	331650 , 3104150	319075 , 3139475
321750 , 3138950	321775 , 3128200	331500 , 3139050	332500 , 3199400
334150 , 3140250	324600 , 3123425	325200 , 3122025	329300 , 3111950
330000 , 3110050	341050 , 3126400	365725 , 3137500	338450 , 3139650
347275 , 3139775	351050 , 3142275	348700 , 3142175	337125 , 3108300
341425 , 3109200	345150 , 3111975	339100 , 3115200	345250 , 3111975
339100 , 3115200	354900 , 3118400	356425 , 3146250	359975 , 3146750
366750 , 3148325	362275 , 3150900	361675 , 3150750	363300 , 3151100
366500 , 3153550	364575 , 3155525	371600 , 3143500	372375 , 3146375
372810 , 3147050	372600 , 3146600	373600 , 3148600	375150 , 3148950
375025 , 3149200	378475 , 3150790	378900 , 3151325	371100 , 3151150
370800 , 3151400	383350 , 3153550	372250 , 3154400	

**Tabla B9.** Fichero tipo de documentación del escenario de riesgo resultante dela aplicación del modelo de lavas.

```

file title      :  FLUJOS1
data type      :  integer
file type      :  binary
columns       :  350
rows          :  350
ref. system    :  tenerife
ref. units     :  km
unit dist.     :  1.0000000
min.X          :  317.425
max.X          :  334.925
min.Y          :  3122.925
max.Y          :  3140.425
resolution     :  .05
min.value      :  0
max.value      :  5
comment        :  Centro de emision (x,y)=( 328.8,3130.1)
comment        :  lmax= 0 Km   hc= 2 m iteraciones: 10000

```